

Universidad de Málaga

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación



Tesis Doctoral

**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE GESTIÓN DE
RECURSOS RADIO EN SISTEMAS CELULARES LTE-A**

Autor

Isabel María Delgado Luque

Directores


M^a Carmen Aguayo Torres y Gerardo Gómez Paredes

Año 2019



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Isabel María Delgado Luque

 <http://orcid.org/0000-0003-0663-674X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

Agradecimientos

Muchas gracias a mi familia por el apoyo que siempre me ha dado; a Jose, por estar siempre ahí y a mis directores de tesis, Gerardo y Mari Carmen, por animarme a continuar con este proyecto hasta el final.

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los Proyectos TEC2013-44442-P y TEC2016-80090-C2-1-R.

Índice general

Agradecimientos	1
Lista de acrónimos	9
Resumen	13
Abstract	15
1. Introducción	17
1.1. Antecedentes y Motivación	17
1.1.1. Los sistemas celulares de Cuarta Generación	17
1.1.2. Planificación de recursos radio	19
1.1.3. Gestión de interferencias	20
1.2. Objetivos de la Tesis	21
1.3. Estructura de la Memoria	23
2. Resumen global de los resultados	25
2.1. Planificación de recursos radio	25
2.1.1. Planificadores de recursos radio con restricciones de retardo	26
2.1.2. Análisis de la imparcialidad entre usuarios	32
2.1.3. Gestión de recursos en la nube (CRAN)	39
2.2. Gestión de interferencias	50
2.2.1. Reutilización Fraccional de Frecuencias (FFR)	51
2.2.2. Técnicas de transmisión coordinadas multipunto (CoMP)	60
2.2.3. Expansión del Rango de la Celda (CRE)	65

2.3. Desarrollo de una herramienta de simulación para LTE-Advanced . . .	72
2.3.1. Arquitectura del Simulador	73
3. Conclusiones y Líneas Futuras de Trabajo	79
3.1. Conclusiones	79
3.2. Líneas Futuras de Trabajo	81
Bibliografía	83
A. Copia de los Trabajos	91

Índice de figuras

2.1. Retardo medio, percentil 95 del retardo, tasa de pérdida de paquetes y tasa de transmisión por usuario para los algoritmos evaluados . . .	31
2.2. Tasa media de transmisión por usuario	36
2.3. Tiempo de acceso al canal por usuario (%)	37
2.4. Diferencia en la tasa de transmisión por usuario (en bps/Hz) entre el mejor y el peor usuario en función de la SNR media	38
2.5. Tasa de transmisión total (en bps/Hz)	39
2.6. Ejemplo de red Ultra-Densa	40
2.7. Propuesta de división funcional (3GPP)	41
2.8. Ejemplo de RAN centralizada	41
2.9. Transmisión HARQ con diferentes tiempos de recepción de ACKs . .	43
2.10. <i>Net Rate</i> (bps) para $t_{TB} = 1\text{ms}$, $t_{ACK} = 8\text{ ms}$	46
2.11. <i>Net Rate</i> (bps) para $t_{TB} = 2\text{ms}$, $t_{ACK} = 8\text{ ms}$	46
2.12. <i>Net Rate</i> (bps) para $t_{TB} = 1\text{ms}$, $W = 8$	47
2.13. <i>Net Rate</i> (bps) para $t_{TB} = 2\text{ms}$, $W = 8$	47
2.14. Tasa de transmisión por usuario, SR=6 Mbps	48
2.15. Tasa de transmisión por usuario, SR=300 kbps	48
2.16. Tasa de transmisión por usuario, SR=2.6 Mbps	49
2.17. Tasa de transmisión por usuario, SR=950 kbps	49
2.18. Ejemplo de topología celular con FFR	52
2.19. a) Curva de Lorenz, b) Curva de Lorenz generalizada	56
2.20. a) SINR, b) Tasa de transmisión potencial	58
2.21. a) Tasa de transmisión alcanzable por el sistema, b) Partición del ancho de banda del sistema	59



2.22. Evolución del índice de Gini (ETR truncado) vs. factor de truncamiento, b) Tasa total de transmisión	60
2.23. Topología celular de un esquema PFR (izquierda) y Transmisión Conjunta (JT) en transmisión (derecha)	61
2.24. SNR media por usuario (usuario del borde de la celda en color rojo) .	64
2.25. a) Retardo medio de paquete en toda la celda, b) Retardo medio de paquete para los usuarios del borde de la celda	65
2.26. a) Tasa media de transmisión en toda la celda, b) Tasa media de transmisión para los usuarios del borde de la celda	66
2.27. Escenario P-1	68
2.28. Escenario P-2	68
2.29. Escenario P-3	68
2.30. Realización espacial de usuarios	68
2.31. Asociación de usuarios por nivel	70
2.32. Porcentaje de Carga de PRB por nivel	70
2.33. Porcentaje de usuarios de baja tasa de transmisión	70
2.34. Tasa de transmisión agregada	71
2.35. Imparcialidad (índice de Jain)	71
2.36. WM-SIMA: Arquitectura de nivel de enlace	75

Índice de tablas

2.1. Parámetros de simulación por defecto	30
2.2. Parámetros de los algoritmos de planificación radio	30
2.3. Parámetros de simulación por defecto	45
2.4. Umbrales de retardo para usuarios con diferentes tasa de fuente, de acuerdo a la Ecuación (2.11) con $W = 8$ and $t_{TB} = 2ms$	47
2.5. Parámetros de simulación	63
2.6. Parámetros de simulación por defecto	67

Lista de acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ABS	Almost Blank Subframe
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AP	Access Point
ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBU	Base Band Unit
BC	Best Channel
BER	Bit Error Rate
BLER	BLock Error Rate
BS	Base Station
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
CD-EDD	Channel Dependent Earliest Deadline Due
CDF	Cumulative Distribution Function
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission
CQI	Channel Quality Indicator
CRAN	Cloud Radio Access Network
CRC	Cyclic Redundancy Code
CRE	Cell Range Expansion
DL	Downlink
eICIC	enhanced Inter-Cell Interference Coordination
EDD	Earliest Deadline Due
eNB	enhanced NodeB

FDD	Frequency Division Duplex
FFR	Fractional Frequency Reuse
HARQ	Hybrid-Automatic Repeat Request
HetNets	Heterogeneous Networks
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
ISI	Inter-Symbol Interference
JT	Joint Transmission
LA	Link Adaptation
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MAP	Macro Access Point
MBS	Macro Base Station
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NR	Net Rate
OFDM	Orthogonal Frequency Domain Multiplexing
OLLA	Outer Loop Link Adaptation
PAP	Pico Access Point
PDF	Probability Density Function
PF	Proportional Fair
PFR	Partial Frequency Reuse
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	Quality Class Indicator
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RR	Round Robin
RRU	Remote Radio Unit
SBS	Small-cell Base Station

SFN	Single Frequency Network
SINR	Signal to Noise plus Interference Ratio
SISO	Soft Input Soft Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SOVA	Soft Output Viterbi Algorithm
TB	Transport Block
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL	Uplink
VoIP	Voice over IP

Resumen

Esta tesis doctoral está enfocada en el análisis de técnicas de gestión de recursos radio sobre redes celulares LTE-Advanced. En particular, se abordan dos grandes bloques de técnicas de gestión de recursos: en primer lugar, el análisis se centra en algoritmos de planificación de recursos radio; en segundo lugar, se han analizado aquellas técnicas orientadas a la gestión de interferencias sobre redes celulares.

Comenzando por los algoritmos de planificación de recursos radio, se han analizado varios algoritmos que tienen en cuenta requisitos de retardo. Además, se ha analizado la imparcialidad entre usuarios para un algoritmo Proportional Fair (PF) con criterios de Relación Señal a Ruido (SNR) frente al criterio de tasa de transmisión, obteniendo expresiones de forma cerrada para la distribución de la SNR por usuario y del sistema para este segundo caso. Se ha demostrado que existen notables diferencias en términos de distribución de probabilidad asociada con la SNR por usuario y por sistema. Por último, se ha abordado la gestión de recursos para una arquitectura de Red de Acceso Radio en la nube (Cloud-RAN). En particular, se ha analizado el impacto del retardo en el informe H-ARQ sobre el rendimiento del usuario.

En cuanto a las técnicas de gestión de interferencias, se ha comenzado por el análisis del rendimiento del sistema en un despliegue celular basado en Reutilización Fraccional de Frecuencias (FFR) cuando se utilizan esquemas de asignación de recursos diferentes. Se ha propuesto un método para determinar la tasa total de transmisión y el ancho de banda óptimo de partición de cada celda bajo cada estrategia de planificación de recursos. Además, se han analizado las técnicas coordinadas para la gestión de interferencias cuando se aplica desde varios puntos de acceso. En particular, se ha evaluado la técnica de Transmisión Conjunta (JT) sin precodifi-

cación y se ha comparado con la técnica de Reutilización Parcial de Frecuencias (PFR) para la transmisión de tráfico entre máquinas, mostrando que la técnica PFR presenta mejor resultado en términos de retardo y tasa media de transmisión para el tipo de tráfico considerado. Por último, se ha analizado la técnica de Expansión del Rango de la Celda (CRE), evaluando la influencia del valor del sesgo asociado a la técnica CRE sobre las prestaciones medias de una red LTE-A heterogénea considerando varias densidades de estaciones base.

Abstract

This dissertation is focused on the analysis of radio resource management techniques on LTE-Advanced cellular networks. In particular, two types of resource management techniques are addressed: first, the analysis focuses on radio resource scheduling algorithms; secondly, those techniques oriented to inter-cell interference management on cellular networks have been analyzed.

Starting with the radio resource scheduling, several algorithms that take into account delay requirements have been analyzed. In addition, the fairness among users for a Proportional Fair (PF) algorithm with signal-to-noise ratio (SNR) criterion was analyzed against the transmission rate criterion, obtaining closed-form expressions for the per user and system SNR distributions for the latter case. It has been shown that there are notable differences in terms of probability distribution associated with the per user and per system SNR. Finally, the resource management for a Cloud Radio Access Network (Cloud-RAN) has been addressed. In particular, the impact of the delay on the H-ARQ report on the user performance has been analyzed.

Regarding the interference management techniques, the analysis of the system performance in a cellular deployment based on Fractional Frequency Reuse (FFR) has been done when using different resource allocation schemes. A simple method has been proposed to determine the total transmission rate and the optimal partition bandwidth for each resource allocation strategy. In addition, coordinated techniques for interference management have been analyzed when applied from several access points simultaneously. In particular, Joint Transmission (JT) without precoding has been evaluated and compared with the Partial Frequency Reuse (PFR) technique for the case of Machine-to-Machine traffic type, showing that PFR technique outperforms JT in terms of delay and average transmission rate. Finally, the Cell Range

Expansion (CRE) technique has been studied, evaluating the influence of the value of the bias associated with the CRE technique on the average performance of a heterogeneous LTE-A network considering different base stations densities.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y Motivación

1.1.1. Los sistemas celulares de Cuarta Generación

Las redes celulares están planificadas en forma de celdas (centradas alrededor de un punto de acceso) cuyo tamaño viene básicamente determinado por la potencia empleada en la comunicación y el entorno que le rodea. Tradicionalmente, los terminales móviles se conectan a la red estableciendo un enlace bidireccional que les conecta con el punto de acceso que les proporciona una mejor Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR), generalmente asociada al punto de acceso más cercano. En ocasiones, pueden existir varios puntos de acceso a los que sería posible conectarse, ya que la señal procedente de ambos se recibe con potencia similar (sobre todo en los bordes de las celdas). Este solape puede producir interferencias en el enlace establecido, que tradicionalmente se han reducido empleando bandas de frecuencia diferentes para celdas contiguas (reutilización relajada de frecuencias).

Las especificaciones de capa física de los últimos sistemas celulares (como LTE [1] y [2]) incluyen el uso de técnicas multiportadora basadas en multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM). Es conocido que el canal móvil presenta particularidades relativas a los desvanecimientos en espacio, tiempo y frecuencia, que es preciso manejar. La modulación multiportadora divide el ancho de banda disponible en bandas suficientemente estrechas para ser consideradas planas. De esta forma

pueden emplearse técnicas de transmisión adaptativa que consideran las variaciones (en tiempo y frecuencia) de la SNR recibida para adaptarse a ellas mediante la modificación de la modulación, tasa de codificación y/o potencia instantánea en cada banda de frecuencias. OFDM también ha permitido planificar redes celulares en las que todos los puntos de acceso empleen una única banda de frecuencias. En estas redes de frecuencia única (SFN) la transmisión ocurre desde un conjunto de puntos de acceso sincronizados, lo que permite la combinación en el aire de las señales. El uso de redes de frecuencia única permite aumentar la capacidad del sistema, aunque requiere de técnicas complejas de cooperación entre puntos de acceso para minimizar las interferencias intercelda. Esta comunicación coordinada resulta especialmente beneficiosa para los terminales ubicados en el solape entre las áreas de cobertura de distintas celdas.

Además, los estándares desarrollados en los últimos años para redes celulares han ido incorporando el uso obligatorio de múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO) en sus especificaciones. El uso de múltiples antenas sobre redes celulares puede ser explotado tanto para reducir la tasa de error o para aumentar la velocidad de la transmisión [3].

Con el objetivo de seguir aumentando la velocidad de transmisión, recientemente se han planteado nuevas técnicas para explotar al máximo la diversidad espacial. Así, la conexión del terminal a la red se hace a través de más de un punto de acceso, en lo que se conoce como comunicaciones coordinadas. Por ejemplo, es posible hacer una transmisión sincronizada desde dos puntos de acceso que se combinan en el receptor o establecer dos transmisiones simultáneas hacia los dos puntos de acceso. Estas técnicas son especialmente útiles para terminales situados en los bordes de las celdas, donde la cobertura es peor [4].

Las técnicas de transmisión multipunto coordinada (CoMP) son una de las principales funciones definidas por el 3GPP para la tecnología celular LTE-Advanced con el objetivo de mejorar la cobertura, la eficiencia espectral y la velocidad de transmisión (throughput) en el borde de las celdas [5]. Para ello, los puntos de acceso necesitan estar sincronizados y coordinados, mediante el envío de señalización específica.

Este tipo de técnicas de transmisión coordinada es especialmente útil en redes heterogéneas (HetNets), comúnmente formadas por estaciones base que utilizan po-

tencias de transmisión diferentes y/o múltiples tecnologías de acceso de radio [6]. Las redes heterogéneas constituyen un medio interesante para expandir la capacidad de la red móvil mediante la combinación de nodos de bajo consumo que dan servicios a celdas pequeñas (femtoceldas o picoceldas) con otros nodos de acceso que sirven a celdas grandes (macroceldas). La reutilización de las bandas de frecuencias en estas dos capas requiere una estrecha coordinación entre los nodos de acceso para lograr una adecuada gestión de las interferencias.

La transmisión multipunto coordinada añade diversidad espacial al disponer de varios canales de transmisión independientes hacia o desde el terminal. Pero es posible llevar más allá esta diversidad espacial cuando cada uno de los puntos de acceso está equipado con múltiples antenas. Este escenario puede verse como un sistema MIMO generalizado, compuesto por múltiples antenas distribuidas entre todos los terminales y nodos de acceso, donde la correlación entre caminos es variable en función de la distancia entre las antenas. La gestión de las interferencias en este sistema multiantena generalizado resulta verdaderamente compleja.

1.1.2. Planificación de recursos radio

Uno de los continuos retos en comunicaciones inalámbricas es mejorar el aprovechamiento de los recursos radioeléctricos compartiéndolos entre un mayor número de usuarios y ofreciéndoles un servicio de calidad adecuada. Actualmente, los sistemas inalámbricos ya permiten explotar la diversidad en espacio, tiempo y frecuencia para mejorar la capacidad y la cobertura mediante técnicas adaptativas de transmisión y multiplexación. Esto se ha conseguido mediante el uso de múltiples antenas, modulación adaptativa, técnicas multiportadora y el uso de un planificador de recursos radio adecuado.

Cuando se trabaja con canales móviles, la variabilidad del canal es el principal inconveniente con el que se ha de lidiar. No obstante, es posible aprovechar esta variabilidad para mejorar las prestaciones del sistema de comunicaciones. Esencialmente, el hecho de que el canal cambie permite esperar que, en diferentes condiciones, el canal pueda pasar de ser excepcionalmente malo a ser un canal apto para una buena comunicación. Y esto no sólo ocurrirá en la dimensión temporal, sino que se puede extender al dominio de la frecuencia y al dominio espacial.

El objetivo del planificador de recursos es conseguir el máximo aprovechamiento posible de los recursos radio tiempo-frecuencia, garantizando a su vez un acceso lo más equitativo posible a los recursos del sistema, independientemente de la posición del usuario dentro de la celda [7]. Es decir, se trata de evitar que los usuarios situados en el exterior de la celda perciban un servicio sensiblemente peor que el resto de usuarios.

Existen numerosos trabajos relacionados con la planificación de recursos (scheduling) para sistemas celulares basados en OFDM [8]. Otros trabajos se centran en la evaluación de algoritmos de planificación con múltiples antenas y OFDM, lo cual añade un grado más de libertad en la asignación de recursos [9]. También es responsabilidad del planificador garantizar ciertos requisitos de Calidad de Servicio (QoS) en términos de prioridad, velocidad de transmisión, retardo o probabilidad de pérdidas de paquetes. De esta manera se establece al mismo tiempo un reparto equitativo de los recursos del sistema [7][10].

El problema se complica para escenarios que utilicen transmisión multipunto coordinada. En este caso, la tarea de planificación de recursos (distribuida o centralizada) aún requiere un estudio pormenorizado dada la cantidad de variables en juego. Además, el análisis pormenorizado de la imparcialidad de los usuarios en algunos escenarios aún está pendiente en la literatura.

1.1.3. Gestión de interferencias

Las redes celulares de última generación han introducido otros métodos adicionales para combatir las interferencias en los bordes de las celdas, como es el uso de distintos patrones de frecuencia a lo largo de la celda o del ancho de banda de transmisión. Por ejemplo, la técnica de reutilización fraccional de frecuencias (FFR) se basa en la utilización de una reutilización 1 con baja potencia de transmisión a los usuarios más cercanos al nodo de acceso, mientras que se utiliza una reutilización mayor de 1 con mayor potencia a los usuarios que se encuentran en los bordes de las celdas [11].

Para las redes heterogéneas se está prestando especial interés a un conjunto de técnicas definidas en el 3GPP para LTE-Advanced para la coordinación de interferencias inter-celda mejorada (eICIC), que utiliza la potencia de transmisión en el

dominio frecuencial y espacial para mitigar las interferencias [12] [13]. En esta línea se introduce el concepto de "subtramas casi vacías" (Almost blank subframe, ABS) [14], las cuales se envían con muy baja potencia al no transportar canales de datos. Esta funcionalidad permite reducir la cantidad de interferencias de las macroceldas sobre las picoceldas durante la subtramas ABS. Junto a la transmisión de subtramas ABS se emplea el concepto de Extensión de Rango de la Celda (CRE), que consiste en aumentar la potencia de transmisión de la picocelda de forma coordinada con la transmisión de subtramas ABS por parte de la macrocelda para aumentar el área de cobertura de la picocelda. En este campo existe aún numerosos aspectos por resolver, entre los que se encuentra la gran variación en el nivel de interferencia que un receptor recibe debido a dichas subtramas ABS o la sincronización entre macroceldas. Por tanto, la gestión de interferencias es un aspecto clave para mejorar el rendimiento de los sistemas inalámbricos coordinados y heterogéneos, y está siendo introducida en la mayor parte de los nuevos estándares de comunicaciones inalámbricas.

1.2. Objetivos de la Tesis

Esta tesis doctoral se centra en el estudio de técnicas relacionadas con la gestión eficiente de los recursos radio sobre sistemas inalámbricos adaptativos, coordinados y heterogéneos. Se analizarán distintas técnicas con el objetivo de mejorar la eficiencia espectral en los solapes entre las celdas y proporcionar una Calidad de Servicio (QoS) más justa entre usuarios. En todos los casos se definirán modelos refinados que incluyan imperfecciones y no idealidades de las técnicas estudiadas, con el fin de obtener unos resultados lo más realistas posible.

Este objetivo general puede concretarse en los siguientes objetivos específicos:

1. Planificación de recursos radio: se estudiarán mecanismos capaces de explotar la diversidad espacial y frecuencial disponible en redes inalámbricas multiusuario que emplean modulación y codificación adaptativa. En particular, se evaluarán distintas políticas adaptativas de asignación de recursos en escenarios en los que el tráfico tiene requisitos de retardo. Además, se analizará en detalle el rendimiento de algunos planificadores en cuanto a resultados de imparcialidad (*fairness*) entre usuarios. Por último, también se abordará la gestión de re-

cursos en escenarios en los que el planificador de paquetes se encuentra en la nube, es decir, considerando una arquitectura de Red de Acceso Radio en la nube (Cloud-RAN). Se tendrán en consideración aspectos prácticos como restricciones de QoS o limitación en el canal de retorno.

2. Gestión de interferencias en redes heterogéneas: se analizarán las prestaciones de distintos esquemas de coordinación para redes heterogéneas (HetNets). Este análisis se enfocará en la coordinación entre los nodos de acceso para gestionar las interferencias producidas por la reutilización de frecuencias. Se analizarán las prestaciones de sistemas de comunicaciones móviles heterogéneos y coordinados al aplicar técnicas de gestión de interferencias entre macroceldas y pico/femtoceldas en el dominio del tiempo. Especial interés se prestará a la evaluación de técnicas denominadas Coordinación de Interferencia Intercelda (eICIC) y, entre ellas, se analizarán las técnicas de reutilización fraccional de frecuencias (FFR), poniendo especial énfasis en la imparcialidad entre usuarios, así como en las técnicas de Expansión del Rango de la Celda (CRE). También se evaluarán esquemas de comunicación coordinada, en la que los terminales establecen enlaces con más de un punto de acceso. Se medirá la ganancia en capacidad/cobertura que estas técnicas permiten gracias a la gestión de las interferencias en los terminales móviles que se encuentran en las fronteras de las celdas. Se analizarán distintos esquemas de transmisión coordinada entre puntos de acceso para reducir las interferencias de los terminales que se encuentran en las fronteras de las celdas, y se buscarán métodos para reducir la información de señalización que las estaciones base deben compartir para poder cooperar. Además, se evaluará la eficiencia (en términos de cobertura, eficiencia espectral y velocidad de transmisión) de las técnicas propuestas en condiciones no ideales a partir de los mecanismos que ofrece el estándar y se determinarán sus limitaciones prácticas.

Todas estas técnicas serán evaluadas en un simulador a nivel de sistema para la tecnología LTE-Advanced, cuyo desarrollo también forma parte de esta tesis doctoral, con contribuciones contrastables.

1.3. Estructura de la Memoria

La presente memoria de tesis se ha presentado en la modalidad de “Tesis por compendio de publicaciones”, cuya estructura de la memoria está definida por la Normativa de la Universidad de Málaga.

En el capítulo 1 se ha presentado la unidad temática de los trabajos presentados para conformar la tesis, incluyendo el estudio del estado de la cuestión y preliminares, así como los objetivos planteados.

El capítulo 2 contiene un resumen global de los resultados obtenidos y discusión de los mismos, incluyendo una descripción y resultados de las técnicas y funcionalidades evaluadas.

El capítulo 3 describe las principales conclusiones de este trabajo así como posibles líneas futuras de trabajo.

En el Apéndice A se incluye una copia de los trabajos que forman parte integrante de la tesis.

Capítulo 2

Resumen global de los resultados

2.1. Planificación de recursos radio

En esta tesis se han estudiado distintas técnicas de planificación dinámica de recursos (*scheduling*) orientadas a la calidad de servicio (QoS).

En primer lugar, se abordan escenarios en los que el retardo supone un requisito importante, como ocurre en las comunicaciones entre máquinas o en entornos celulares en los que la interactividad del servicio es alta. Se evaluará la ganancia de prestaciones (en términos de tasa de error, eficiencia espectral, velocidad de transmisión por usuario o retardo).

En segundo lugar, se analizará la justicia o imparcialidad (*fairness*) de algunos algoritmos de planificación de recursos entre los distintos usuarios del sistema. Se obtendrán métricas de rendimiento para evaluar el grado de parcialidad entre usuarios que experimentan diferentes calidades del canal o el grado de cumplimiento de la QoS.

En tercer y último lugar, se abordará un escenario de Red de Acceso Radio en la nube (Cloud-RAN), en el que el planificador de paquetes está ubicado en un elemento remoto. Se evaluará la pérdida de prestaciones debido al retardo en el interfaz entre dicho elemento y la estación base.

2.1.1. Planificadores de recursos radio con restricciones de retardo

Algunas estimaciones prevén que el mundo podría tener un billón de dispositivos de comunicaciones en la próxima década. Se espera que la mayoría de ellos sean inalámbricos y que un alto porcentaje no sea operado directamente por los humanos. Las comunicaciones entre máquinas tienen ciertas características que las hacen difíciles de acomodar en redes móviles. En particular, ciertos flujos de datos son muy sensibles al retardo.

Existen aplicaciones entre máquinas (*Machine-to-Machine*, M2M), como la detección y evitación de colisiones en vehículos, alarmas basadas en sensores y control remoto, etc. que requieren valores de latencia extremadamente bajos. Por ejemplo, este es el caso de aplicaciones de tipo videovigilancia, vehículos no tripulados o dispositivos que transportan cámaras de vídeo (generalmente robots) que son controlados de forma remota. En términos de latencia, el flujo de vídeo es más crítico que la señal de control.

Se están realizando esfuerzos para reducir dicho retardo en la Red de Acceso Radio (RAN) para las redes 5G. Sin embargo, hay poco trabajo identificado en la provisión de mejoras para aplicaciones M2M con restricciones de latencia. El uso de planificadores de recursos optimizados para la latencia es, por lo tanto, crucial para que estas aplicaciones con latencia restringida tengan asignados los recursos físicos necesarios para garantizar un funcionamiento correcto.

En un sistema multiusuario, una capa de Control de Acceso al Medio (MAC) optimizada debería asignar recursos radio a los usuarios de acuerdo con varios parámetros, incluidas las características de la fuente de tráfico, las necesidades de QoS [15] y la diversidad de frecuencia, tiempo y espacio del canal radio.

Cuando las fuentes de tráfico son de velocidad variable y sus requisitos de tasa de transmisión fluctúan de forma asíncrona para diferentes usuarios, la explotación de la diversidad multiusuario (ganancia estadística) permite que más usuarios se acomoden en el sistema. Un diseño de la capa MAC adaptable a las características cambiantes del tráfico y del canal, así como a los requisitos específicos de QoS, mejora el rendimiento del sistema al explotar los recursos radio de manera más eficiente [7].

Numerosos algoritmos de planificación radio sobre LTE se han propuesto en la

literatura [16]. Entre ellos se encuentran enfoques heurísticos que tienen en cuenta el comportamiento de la fuente [17][18]. Las técnicas elegidas deben ser lo suficientemente flexibles como para acomodar las fuentes de tráfico tradicionales y la existencia de otras fuentes con diferentes requisitos de QoS.

En este trabajo, nos centramos en la evaluación de algoritmos de asignación de recursos para comunicaciones M2M sobre LTE. Los algoritmos analizados se han elegido teniendo en cuenta diferentes aspectos como: condiciones instantáneas del canal, requisitos de latencia o retransmisiones pendientes.

Descripción de los planificadores evaluados

Se han analizado 3 algoritmos de planificación radio que tienen en cuenta requisitos de retardo: *Opportunistic hard priority* [12][13], *Channel Dependent Earliest Deadline Due* (CD-EDD) [14] y *CD-EDD with postponed EDD term* [15].

a) *Opportunistic Hard Priority*

Este algoritmo aplica una prioridad a las transmisiones de flujos sensibles al retardo si se excede un cierto retardo máximo. El algoritmo establece la misma prioridad para todos los paquetes siempre que el retardo del paquete esté por debajo del umbral y establece una prioridad alta para los paquetes que excedan el umbral. Se asigna un umbral de retardo máximo D_t y un umbral de retardo D_b para cada flujo sensible al retardo. LTE define un retardo máximo para el interfaz radio de 80 ms para tráfico de VoIP [19]. El umbral de retardo del flujo debe elegirse para que sea más bajo que este retardo máximo, con un margen suficiente para que el planificador radio pueda servir paquetes que excedan este umbral antes de violar el retardo máximo. Los paquetes que excedan dicho retardo máximo se descartan. Inicialmente, los usuarios se ordenan cíclicamente según el tiempo de llegada a las colas de transmisión.

El funcionamiento del algoritmo es el siguiente:

1. Configurar los parámetros de retardo: por flujo, D_b , y máximo, D_t .
2. Configurar las prioridades para cada flujo de datos:
 - IF $(D_b - \text{Retardo}_{\text{paquete}}) < 0$ THEN se descarta el paquete

- ELSE IF $(D_b - \text{Retardo}_{\text{paquete}}) < D_t$ THEN prioridad = 1
- ELSE prioridad = 0

3. Ordenar la lista de flujos en base a su prioridad.

- Asignar un conjunto de Bloques de Recursos Físicos (PRBs) al flujo con la prioridad más alta. En caso de empate, se aplica un criterio Round Robin (RR).
- Quitar el flujo servido de la lista.
- Volver a ejecutar el punto 3 si hay más flujos esperando en la lista.

b) *Channel Dependent Earliest Deadline Due* (CD EDD)

La prioridad asignada por este esquema depende de dos componentes: el componente sensible al retardo (EDD) y el componente sensible al canal, que sigue un criterio de *Proportional Fair* (PF). El término PF sigue la expresión $\frac{T_k[n]}{R_k[n]}$, donde $T_k[n]$ es la tasa de transmisión del usuario k en el TTI n , $R_k[n]$ es la tasa media de transmisión del usuario k en el TTI n . El término EDD funciona de tal manera que los usuarios reciben prioridad a medida que el retardo del paquete a ser servido se acerca al retardo máximo. El término PF favorece a los terminales con buenas condiciones instantáneas del canal. La prioridad asignada al usuario k se calcula, por lo tanto, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{T_k[n]}{R_k[n]} \cdot \frac{W_k[n]}{D_k^b - W_k[n]} \quad (2.1)$$

donde $W_k[n]$ es el tiempo de espera en cola del paquete del usuario k (en TTIs), D_k^b es el retardo máximo admisible para el usuario k (en TTIs). A medida que el retardo del paquete aumenta, el término EDD $(\frac{W_k[n]}{D_k^b - W_k[n]})$ domina rápidamente la prioridad.

c) *CD-EDD with postponed EDD term*

Este esquema es una modificación del algoritmo anterior. El término PF ahora dominará la decisión siempre que el retardo del paquete esté lejos de superar el

retardo máximo. Dicho enfoque se basa en la siguiente función de utilidad:

$$\frac{T_k[n]}{R_k[n]} \cdot \left(\frac{\max(0, W_k[n] - D_k^t)}{D_k^b - W_k[n]} + 1 \right) \quad (2.2)$$

donde D_k^t es el umbral de retardo asociado al usuario k . El término asociado al retardo proporcionará prioridad a los usuarios cuyos retardos de paquete sean mayores que este umbral (D_k^t). Si un paquete que espera en la cola ha excedido el retardo máximo, se descarta.

Resultados de simulación

Se ha elegido un algoritmo PF como algoritmo de referencia para evaluar la reducción de latencia lograda con otros algoritmos. Un resumen de los parámetros de simulación se muestra en la Tabla 2.1. La fuente de tráfico M2M utilizada corresponde a la generada por una cámara de videovigilancia IP [11] que transmite un flujo de video de control remoto sensible al retardo. Este tipo de tráfico se puede asignar al Identificador de Clase de Calidad (QCI) 7 en LTE [19]. Para este QCI, el máximo retardo de paquete permitido es de 100 ms. Los parámetros de retardo asociados a cada algoritmo se muestran en la Tabla 2.2.

En la Fig. 2.1 se muestran los resultados de simulación para los algoritmos propuestos: retardo medio, percentil 95 del retardo, tasa de pérdida de paquetes y tasa de transmisión por usuario.

Cuando el retardo del paquete excede el retardo máximo, los tres algoritmos estudiados descartan dicho paquete en lugar de incrementar el retardo de los paquetes restantes a ser atendidos, lo que podría ser más perjudicial para la QoS. El descarte de paquetes es más probable que ocurra cuando la SNR media es baja (0-5 dB). En estas condiciones, la tasa de transmisión por usuario es muy baja debido a la alta probabilidad de interrupción (*outage*) y la necesidad de utilizar esquemas de codificación robustos que aseguren la BLER objetivo. Cuando aumenta la SNR media, la tasa de pérdida de paquetes disminuye hasta hacerse nula en torno a los 15 dB.

Para los tres algoritmos propuestos, la tasa de transmisión es un poco menor que para el algoritmo de referencia (*baseline*), ya que estos algoritmos favorecen a los usuarios que experimentan altos retardos. En general, estos usuarios tienen peores

Tabla 2.1: Parámetros de simulación por defecto

LTE Parameter	Value/Mode
Channel model	Extended pedestrian A (TS 36.803)
Mobile Speed	4 km/h (pedestrian)
Channel Bandwidth	20 MHz
OFDM symbols per TTI	14
PRB size	12 subcarriers
Carrier Frequency	2.5 GHz
Modulation schemes	QPSK, 16QAM and 64QAM
Target BLER	10%
ACK feedback delay	8 ms
CQI delay	2 ms
Nº of CQI bits	4
Max. Number of HARQ retransmissions	8
Number of parallel HARQ processes	8
MIMO mode	2x2 1 layer spatial multiplexing (Beamforming)
Codebook	TS 36.211
Channel Estimation	Non-ideal Zhao
MIMO detection	ZF
Noise power estimation	Error based
Signalling overhead	2/21
Number of users	10
Simulation length	20s
Type of traffic	M2M

Tabla 2.2: Parámetros de los algoritmos de planificación radio

Opportunistic Hard Priority		CD-EDD		CD-EDD with postponed EDD term	
D^b	100 ms	D^b	100ms	D^b	100 ms
D^f	50 ms			D^f	50 ms

condiciones de canal, por lo que su rendimiento es, en consecuencia, menor.

Para el algoritmo *Opportunistic Hard Priority*, el rendimiento cuando aumenta la SNR media es similar a un algoritmo RR, es decir, hay un número menor de

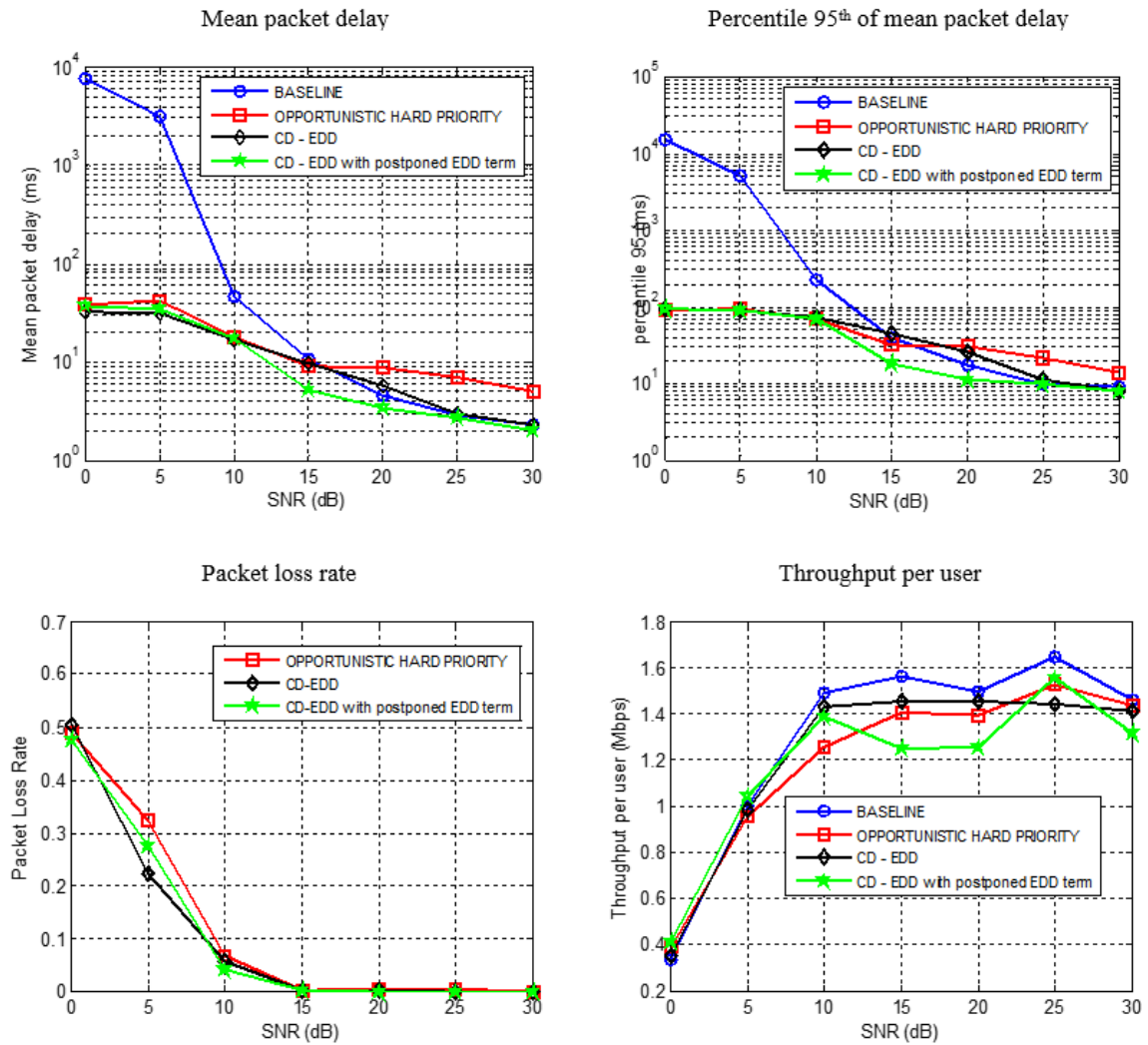


Figura 2.1: Retardo medio, percentil 95 del retardo, tasa de pérdida de paquetes y tasa de transmisión por usuario para los algoritmos evaluados

paquetes cuyo tiempo de espera excede el umbral de retardo; por lo tanto, el algoritmo establecerá la misma prioridad para casi todos los flujos de datos, que se asignarán en un orden cíclico. Esta es la razón por la que el algoritmo de referencia (PF) logra un mejor rendimiento para valores altos de SNR.

Para el algoritmo *Channel Dependent Earliest Deadline Due* (CD EDD), el retardo medio para niveles altos de SNR obtiene valores ligeramente más altos que para

el algoritmo de referencia. Esto se debe a que los retardos bajos en tal escenario y el término EDD otorga una prioridad bastante baja, lo que degrada el rendimiento en comparación con el caso en el que el término PF domina la decisión. Sin embargo, el algoritmo CD-EDD mejora al *Opportunistic Hard Priority*.

Por último, el algoritmo *CD-EDD with postponed EDD term* mejora los resultados de retardo para todo el rango de valores de SNR. A medida que aumenta el valor de la SNR, los retardos disminuyen, por lo que la probabilidad de exceder el valor D_t también disminuye. En esta situación, el algoritmo CD-EDD funciona como un algoritmo PF. Cuando el retardo está por encima de D_t , el término EDD otorga mayor prioridad a ese usuario, lo que disminuye los resultados de retardo medio de paquete. Por lo tanto, los valores de SNR no conducen a prioridades más bajas, como ocurre con el CD-EDD.

2.1.2. Análisis de la imparcialidad entre usuarios

La capacidad instantánea sobre canales inalámbricos cambia aleatoriamente con el tiempo debido a los desvanecimientos de la señal recibida. En ese sentido, es ya conocido que el algoritmo de Mejor Canal (*Best Channel*, BC) alcanza la máxima capacidad del sistema a costa de degradar la imparcialidad entre usuarios [7].

Con el objetivo de mejorar la imparcialidad entre usuarios, usualmente se utiliza una modificación de la estrategia anterior denominada Proporcional Fair (PF), la cual asigna recursos al usuario con las mejores condiciones de canal relativas a su propia media. La función de utilidad a maximizar se definió inicialmente utilizando un criterio de tasa de transmisión [20][21][22][23], donde los recursos se asignan al usuario con la mayor velocidad media de transmisión.

Sin embargo, muchos otros trabajos utilizan un criterio de SNR, mediante el cual los recursos se asignan al usuario con la SNR instantánea ponderada más grande, ya que es más sencillo de tratar matemáticamente, lo que hace posible evaluar la tasa de transmisión por usuario [24] y a nivel de sistema [25]. Por ejemplo, en [26] se presenta un modelo analítico para la distribución de SNR de los usuarios con una estrategia PF cuyo criterio de asignación está basado en SNR. En [27] se analiza la estrategia PF con información de realimentación parcial asumiendo un criterio basado en SNR. El mismo enfoque se ha asumido en muchos otros trabajos, como

en [28] [29] para la estrategia PF con múltiples antenas, o en [30], que propone un nuevo algoritmo PF híbrido que incluye un nuevo método de agrupación de usuarios. En [31] se muestra un enfoque semi-analítico para modelar la interferencia del enlace ascendente considerando un algoritmo PF con criterio basado en SNR.

Puesto que ambos criterios (SNR y tasa de transmisión) utilizan la misma idea [25], se puede inferir que la versión del algoritmo PF basada en SNR proporciona resultados similares a los proporcionados por el que utiliza la tasa de transmisión. Sin embargo, hasta donde sabemos, el rendimiento del criterio basado en la tasa de transmisión aún no se ha analizado en detalle. En un trabajo reciente, [32] presenta expresiones cerradas para el rendimiento del algoritmo PF en escenarios con interferencia considerando la SNR como criterio, aunque señala que, cuando la tasa de transmisión se utiliza como métrica, se debería tener en cuenta la correspondencia entre la SINR y la velocidad del sistema.

En este apartado se analiza en detalle el rendimiento del criterio PF basado en la tasa de transmisión definida en [7]. Las principales contribuciones de este apartado se resumen a continuación:

- Se ha obtenido la función densidad de probabilidad (pdf) de la SNR del sistema y de la SNR por usuario considerando un canal de Rayleigh ergódico.
- Los resultados se han comparado con los obtenidos en [24] y [25] para el criterio basado en SNR con objeto de evaluar si es apropiado o no asumir un comportamiento equivalente en ambos esquemas. Se ha demostrado que el tiempo de acceso al canal para diferentes usuarios es similar para el criterio basado en la SNR, mientras que difiere para el criterio basado en la tasa de transmisión.
- También se ha comprobado analíticamente que para el criterio PF basado en SNR, la pdf de la SNR por usuario solo depende de la SNR promedio de un usuario en particular, mientras que en el criterio basado en tasa de transmisión, no solo depende de la SNR promedio del usuario, sino también de la SNR promedio del resto de usuarios en el sistema.

En el análisis se ha considerado un sistema con una única celda en la que L usuarios (UEs) se comunican con una estación base (BS). Se asume que tanto la

BS como los UEs disponen de una única antena. Se considera la existencia de ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) complejo de media cero y varianza σ_i^2 , y modelo de desvanecimiento Rayleigh para la propagación multicamino.

A continuación se muestran las expresiones analíticas resultantes para ambos algoritmos, cuyo desarrollo pormenorizado puede encontrarse en el artículo [33] adjuntado en el Anexo A.

PF con criterio basado en SNR

Considerando γ_i la SNR instantánea, la función de utilidad en un instante t para el algoritmo PF con criterio basado en SNR viene dada por:

$$u_i^{SNR}(t) = \gamma_i(t)/\bar{\gamma}_i \quad (2.3)$$

Las pdfs resultantes para la SNR por usuario y del sistema vienen dadas por las siguientes expresiones [24] [25], respectivamente:

$$f_{\gamma_i}^{SNR}(\gamma) = Pr(u_i^{SNR} < u_{-i}^{SNR})\delta(\gamma) + \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \sum_{k=0}^{L-1} (-1)^k \binom{L-1}{k} \exp\left(-(1+k)\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_i}\right) \quad (2.4)$$

$$f_{\gamma_s}^{SNR}(\gamma) = \sum_{i=1}^L \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} (-1)^k \binom{L-1}{k} \exp\left(-(1+k)\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_i}\right) \quad (2.5)$$

donde $\delta(\gamma)$ es la función Delta de Dirac.

PF con criterio basado en tasa de transmisión

En este caso, la función de utilidad para el usuario i en el instante t viene dada por:

$$u_i^{RATE}(t) = r_i(t)/\bar{r}_i \quad (2.6)$$

donde $r_i(t)$ y \bar{r}_i representan la tasa de transmisión potencial en el instante t y la capacidad ergódica del usuario i , respectivamente.

Las pdfs resultantes para la SNR por usuario y del sistema vienen dadas por las siguientes expresiones [33], respectivamente:

$$f_{\gamma_i^*}^{RATE}(r) = Pr(u_i^{RATE} < u_{-i}^{RATE})\delta(\gamma) + \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_i}\right) \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^L \left(1 - \exp\left(-\frac{\left((1+\gamma)^{\frac{\bar{\gamma}_k}{\bar{\gamma}_i}} - 1\right)}{\bar{\gamma}_k}\right)\right) \quad (2.7)$$

$$f_{\gamma_s}^{RATE}(\gamma) = \sum_{i=1}^L \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_i}\right) \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^L \left(1 - \exp\left(-\frac{\left((1+\gamma)^{\frac{\bar{\gamma}_k}{\bar{\gamma}_i}} - 1\right)}{\bar{\gamma}_k}\right)\right) \quad (2.8)$$

La primera diferencia importante entre ambos criterios se refleja atendiendo a la definición de su función de utilidad. Cuando se asume la estrategia basada en SNR, todos los usuarios son idénticos en un sistema con desvanecimiento de Rayleigh, por lo que se asigna el mismo porcentaje de tiempo de acceso al canal para cada usuario. Debe tenerse en cuenta que no significa que todos los usuarios alcancen la misma velocidad de transmisión, ya que la utilización del canal depende de la SNR media asociada con cada usuario. Por el contrario, con el criterio basado en tasa de transmisión no ocurre esto, por lo que se asigna un porcentaje diferente de tiempo de acceso de canal a cada uno.

Además, en un criterio PF basado en SNR, la pdf de la SNR por usuario (ecuación (2.4)) solo depende de la SNR promedio del usuario y del número de usuarios. Sin embargo, cuando se usa un criterio de PF basado en tasa de transmisión, esta distribución (ecuación (2.7)) no solo depende de la SNR promedio del usuario individual (y la capacidad ergódica) sino también de la SNR promedio del resto de usuarios del sistema. Al analizar las ecuaciones (2.4) y (2.7), se observa que ambos criterios son solo equivalentes cuando todos los usuarios experimentan el mismo valor de SNR promedio y, en este caso, ambos se comportan como la mejor estrategia de canal.

A continuación se muestran una comparativa entre ambos algoritmos, considerando un escenario con 5 usuarios, cuya SNR media, $\bar{\gamma}_i$, se ha obtenido mediante una distribución lognormal de media Γ (que representa la SNR media de la celda)

y desviación estándar σ de 4 dB (valor típico para microceldas [34]). En particular, los usuario $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ se corresponden con el percentil $\{10\text{th}, 30\text{th}, 50\text{th}, 70\text{th}, 90\text{th}\}$. De esta forma, el usuario 1 está asociado con la SNR media más baja.

La Fig. 2.2 muestra la tasa de transmisión alcanzable por usuario, R_i , como una función de la SNR media de la celda, Γ , en un escenario de 5 usuarios.

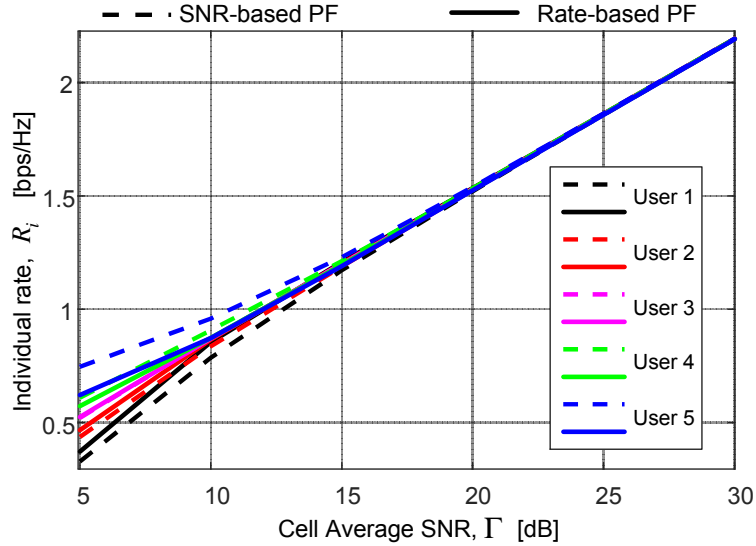


Figura 2.2: Tasa media de transmisión por usuario

Se puede observar que la imparcialidad (en términos de tasa de transmisión) es más justa para valores bajos de Γ . Si se usa el criterio PF basado en SNR, el rendimiento por usuario para el conjunto de usuarios es siempre el mismo para cualquier valor de Γ : una SNR media $\bar{\gamma}_i$ más alta representa tasas asignadas más altas. Sin embargo, cuando se aplica el criterio de PF basado en tasa de transmisión, el usuario con la SNR media más alta puede no ser el usuario con las tasas asignadas más altas, pero depende del valor de la SNR promedio de la celda. Esta diferencia se debe al hecho de que el criterio PF basado en SNR asigna el mismo porcentaje de tiempo de acceso al canal a todos los usuarios [24] mientras que este porcentaje depende del escenario específico si se usa el criterio PF basado en la velocidad. Al analizar la expresión de utilidad, es fácil ver que el valor de utilidad se incrementa para los usuarios con tasas medias potenciales más bajas (es decir, SNR media más baja). Por lo tanto, se les asigna un mayor porcentaje de tiempo de acceso al canal.

Fig. 2.3 representa la evolución en el tiempo de acceso al canal por usuario (medido en %) en un escenario de 5 usuarios.

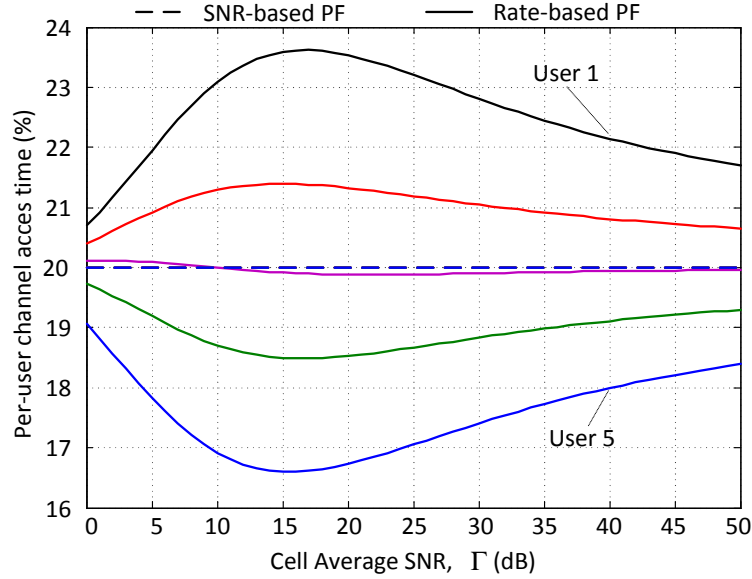


Figura 2.3: Tiempo de acceso al canal por usuario (%)

Se puede ver que el esquema PF basado en SNR es estrictamente justo en términos de tiempo de acceso al canal. De hecho, todos los usuarios reciben el mismo porcentaje de tiempo de acceso al canal (20% en este caso), por lo que todas las curvas están superpuestas. Sin embargo, el porcentaje de tiempo de acceso al canal asociado a cada usuario es muy diferente cuando se utiliza un esquema PF basado en la tasa. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de acceso al canal asignado a cada usuario depende de su SNR media, es decir, cuanto mayor sea la SNR media, menor será el porcentaje del tiempo de acceso del canal asignado. Tenga en cuenta que los resultados de tasa de transmisión individual que se muestran en la figura anterior ya incluye el impacto del tiempo de acceso de canal asignado a cada usuario. Cabe señalar que todas las curvas tienden a un valor constante a medida que aumenta la SNR media de la celda. La razón es que, a medida que aumenta la SNR media de la celda, la diferencia relativa entre el valor de R_i asociado a cada usuario es menor, ya que su desviación σ se mantiene constante. Como resultado, el porcentaje de tiempo de acceso al canal es similar para todos los usuarios. Sin

embargo, debe notarse que si se usa un cálculo más realista de la tasa de transmisión potencial (por ejemplo, incluyendo el impacto de un conjunto limitado de esquemas de modulación), este efecto ocurre a valores más bajos de SNR media.

La Fig. 2.4 muestra la diferencia en la tasa de transmisión por usuario (en bps/Hz) entre el mejor y el peor usuario en función de la SNR media para diferentes números de usuarios en la celda (de 3 a 81 usuarios). Es decir, se representa el grado de imparcialidad entre usuarios, medido como: $\max(R_i) - \min(R_i)$. Se ha seleccionado el valor de la SNR media asociada con cada usuario, $\bar{\gamma}_i$, de modo que cada uno de ellos represente un percentil predefinido de la distribución de SNR media de la celda; en particular, los percentiles se establecen de acuerdo con los siguientes criterios: [10:40:90]th para 3 usuarios, [10:20:90]th para 5 usuarios, [10:10:90]th para 9 usuarios, [10:5:90]th para 17 usuarios y [10:1:90]th para 81 usuarios. Los resultados muestran que el criterio de PF basado en la tasa de transmisión siempre es más justo que el basado en SNR. Además, observamos diferencias mucho más altas entre el mejor y el peor usuario en valores bajos de SNR media. Finalmente, vale la pena señalar que la imparcialidad mejora a medida que aumenta el número de usuarios en la celda.

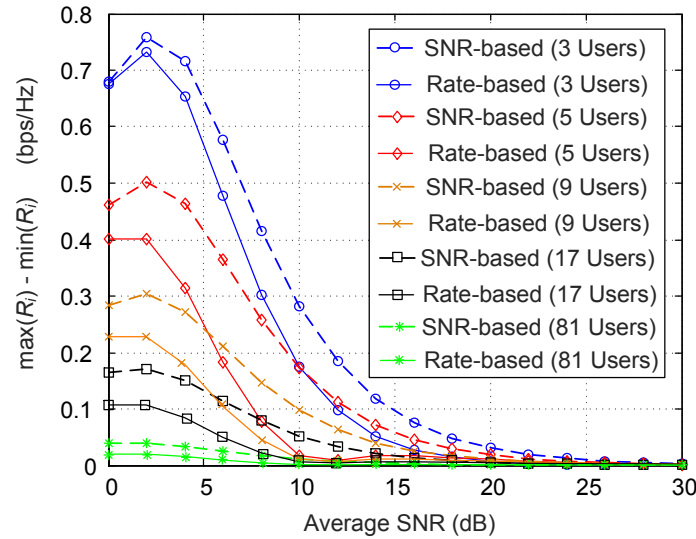


Figura 2.4: Diferencia en la tasa de transmisión por usuario (en bps/Hz) entre el mejor y el peor usuario en función de la SNR media

Se debe tener en cuenta que, aunque el criterio basado en la tasa de transmisión proporciona una mayor imparcialidad que el basado en la SNR, esto se logra a costa de degradar la tasa de transmisión total del sistema. Esto se confirma en la Fig. 2.5, que muestra la tasa de transmisión total (en bps/Hz) en función de la SNR media para un número diferente de usuarios en la celda (de 3 a 81 usuarios). Por un lado, los resultados muestran que un mayor número de usuarios proporciona una ganancia por diversidad multi-usuario. Por otro lado, se observa que los algoritmos proporcionan resultados similares solo para valores altos de SNR media; para valores bajos de SNR media, el criterio basado en tasa de transmisión alcanza una tasa total más baja (especialmente cuando el número de usuarios es alto) para mejorar la imparcialidad.

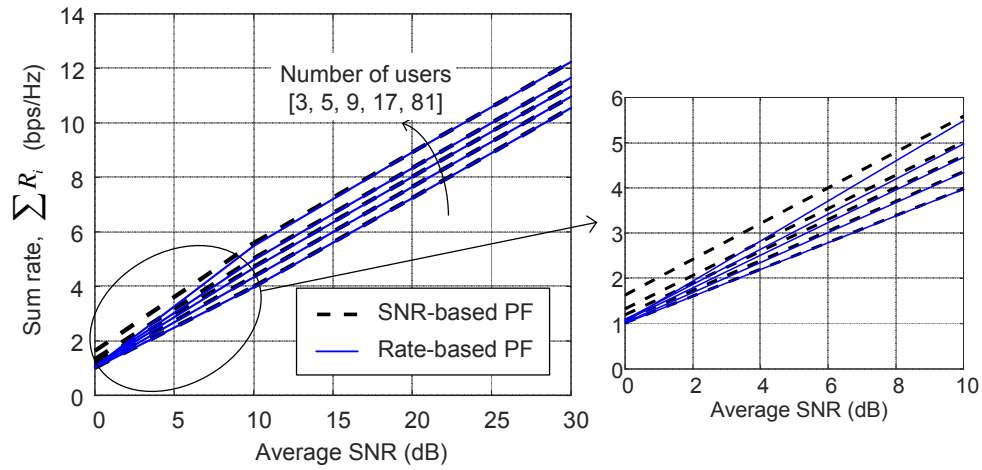


Figura 2.5: Tasa de transmisión total (en bps/Hz)

2.1.3. Gestión de recursos en la nube (CRAN)

Las redes móviles están evolucionando hacia despliegues ultra densos donde coexisten diferentes redes de acceso radio, como se muestra en la Fig. 2.6.

El diseño de la Red de Acceso de Radio (RAN) centralizada en 5G surge como una solución para gestionar eficazmente los recursos, lo que hace que algunas funciones se implementen en un hardware compartido. La recopilación de los recursos de procesamiento en centros de datos compartidos aumenta la reducción de los costes

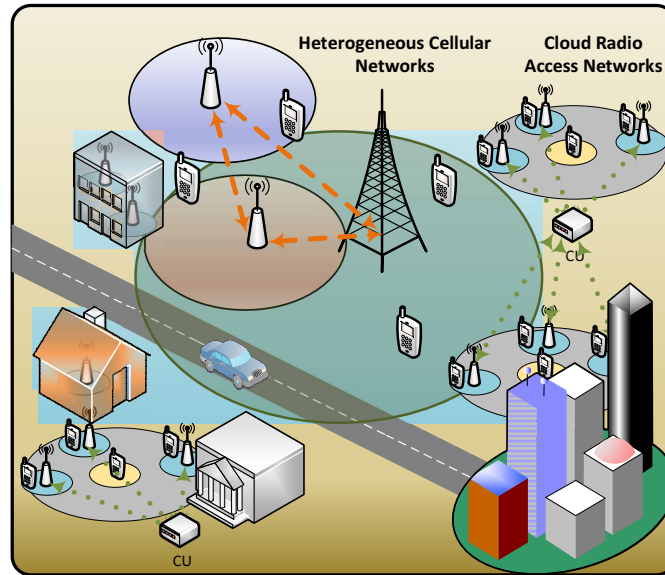


Figura 2.6: Ejemplo de red Ultra-Densa

de implementación y administración. Si esos recursos se ejecutan en infraestructuras virtualizadas ayudadas por las tecnologías de red definida por software (SDN) [35] y virtualización de la función de red (NFV) [36], la RAN centralizada se convierte en una RAN en la nube (*Cloud RAN*, CRAN) [37].

En el contexto de la CRAN, pueden coexistir varios métodos de centralización entre NodeBs evolucionados (eNBs). El 3GPP recomienda diferentes niveles de división funcional (ver Fig. 2.7) en los que una parte de la lógica está ubicada en la Unidad Radio Remota (RRU) mientras que el resto está ubicado en la Unidad de Banda Base centralizada (BBU) [38]. Esta centralización implica una nueva arquitectura de red en la que todo el procesamiento de banda base se realiza en centros de datos centralizados (BBU) y las señales radio se intercambian con RRUs a través de conexiones de fibra óptica de baja latencia (Fig. 2.8). Existen distintas opciones para realizar dicha división funcional. Por ejemplo, la opción 6 [38] centraliza las funcionalidades hasta la capa de control de acceso al medio (MAC) en el lado BBU [39], dejando solo la capa física en las RRU. En términos de latencia, los requisitos de la conexión de ida y vuelta son críticos [40]. Dado que el despliegue de fibra óptica es caro, se han considerado otras soluciones para facilitar el acceso a la RAN centralizada.

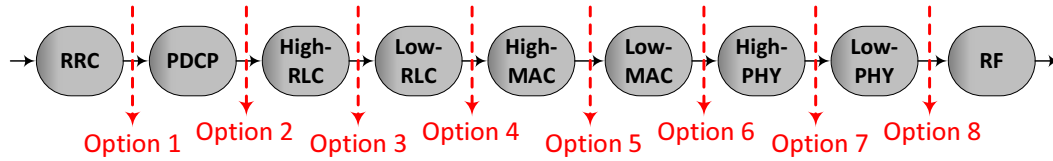


Figura 2.7: Propuesta de división funcional (3GPP)

En este apartado se analiza el impacto del retardo debido a conexiones no ideales entre la BBU y RRU sobre el rendimiento del usuario, teniendo especial interés en los procesos HARQ de la capa física.

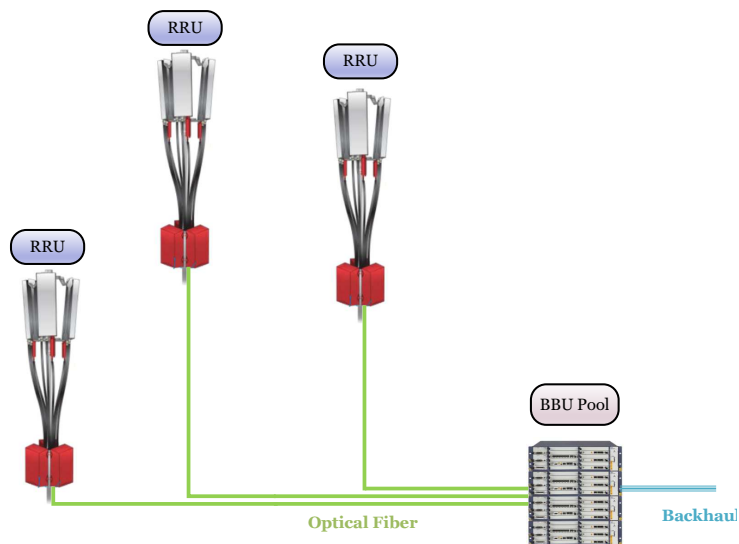


Figura 2.8: Ejemplo de RAN centralizada

Modelo de sistema

Se ha considerado la opción 6 de división funcional [38], en la que la capa MAC está centralizada, mientras que las capas inferiores están ubicadas en la RRU. Los datos del usuario se encapsulan y codifican en Bloques de Transporte (TB) cuyos tamaños dependen del Esquema de Modulación y Codificación (MCS) y del número de Bloques de Recursos Físicos (PRB) asignados por el planificador de recursos radio. Además, la modulación y codificación adaptativa (AMC) junto con la planificación de PRBs hacen que el MCS cambie con el tiempo. Los usuarios informan periódicamente

sobre su indicador de calidad de canal (CQI) para realizar un seguimiento de la SINR recibida. El tamaño de TB seleccionado depende del índice MCS finalmente asignado (es decir, la calidad del canal) y del número de PRBs asignados. El tamaño promedio de TB para un determinado usuario se denomina $\overline{\text{TB}_{\text{tamaño}}}$.

Además, el tiempo medio entre dos asignaciones de recursos consecutivas a un usuario determinado se denomina t_{TB} . El planificador asigna recursos a un usuario con una periodicidad máxima de un Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI), es decir, $t_{\text{TB}} \geq 1\text{ms}$. Se debe tener en cuenta que, desde el punto de vista de la asignación de recursos radio, el planificador solo tendrá en cuenta a un usuario si hay datos para transmitir. Por lo tanto, el intercambio de recursos no solo depende de los recursos disponibles sino también del patrón de tráfico.

La funcionalidad HARQ [41] utiliza un protocolo de parada y espera: cuando se envía un TB, la entidad transmisora espera hasta que se recibe un ACK o NACK. La recepción de un TB erróneo conduciría a la retransmisión de dicho TB hasta que el paquete se reciba correctamente o se alcance el número máximo de retransmisiones. Para optimizar la velocidad de transmisión, generalmente se emplean varios procesos HARQ paralelos; cada proceso HARQ envía un TB cuando los recursos se asignan al usuario y espera su confirmación asociada. Este procedimiento se repite hasta que se alcanza el número máximo de procesos HARQ, W , después de $W \cdot t_{\text{TB}}$ segundos. En el caso de LTE FDD, hay un máximo de $W = 8$ procesos HARQ paralelos [42].

Tasa de transmisión neta (*Net Rate*)

Definimos el concepto de *Net Rate* (NR) como la tasa de transmisión que un usuario determinado puede lograr teniendo en cuenta las condiciones reales de la transmisión, definido como:

$$\text{NR} = \frac{\overline{\text{TB}_{\text{size}}} \cdot W}{t_W}, \quad (2.9)$$

donde W es la ventana de transmisión (es decir, el número de procesos HARQ) y t_W es el tiempo requerido para reutilizar un proceso HARQ, dado por el máximo entre el tiempo necesario para enviar de vuelta el ACK y el tiempo requerido para la ejecución de todos los procesos HARQ:

$$t_W = \max(t_{\text{ACK}}, W \cdot t_{\text{TB}}). \quad (2.10)$$

Se debe tener en cuenta que si $t_{ACK} > W \cdot t_{TB}$, después de $W \cdot t_{TB}$, el proceso HARQ estará esperando su llegada de ACK/NACK. Como consecuencia, los procesos HARQ asociados al usuario se bloquearán, lo que reducirá el *Net Rate*. Por otro lado, si $t_{ACK} < W \cdot t_{TB}$, el proceso HARQ estará listo para transmitir (o retransmitir) un TB en el próximo TTI. Se alcanzaría así el rendimiento máximo: $\overline{TB_{size}}/t_{TB}$.

La Fig. 2.9 muestra este concepto gráficamente para dos ejemplos diferentes de t_{ACK} . El primero, t_{ACK-1} representa un ACK que se recibe antes de que se gestionen todos los procesos HARQ y, por lo tanto, la entidad HARQ puede transmitir sin más demora. Sin embargo, en el segundo caso, t_{ACK-2} muestra un ACK que se recibe después de $W \cdot t_{TB}$, lo que provoca el bloqueo del proceso HARQ. Tenga en cuenta que el mínimo de t_{TB} definido para un sistema LTE es 1ms y, por lo tanto, el mínimo de t_W es 8 ms si se utilizan 8 procesos HARQ. Por este motivo, un $t_{ACK} < 8$ ms no afectará al *Net Rate* para $W = 8$. De lo contrario, debe analizarse el umbral a partir del cual disminuye la velocidad de transmisión.

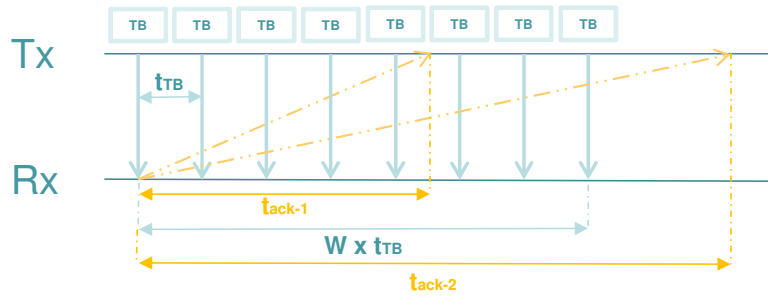


Figura 2.9: Transmisión HARQ con diferentes tiempos de recepción de ACKs

Una vez que se haya definido el *Net Rate*, el efecto de un mayor retardo en el informe podría evaluarse como un incremento en t_{ACK} . Sin embargo, el impacto de dicho retraso en el rendimiento del usuario también depende de la tasa de transmisión de la fuente (*Source Rate*, SR), es decir, la velocidad de tráfico de datos transmitida al usuario. Mientras que el *Net Rate* sea mayor que la velocidad de la fuente transmitida a un usuario determinado, su rendimiento no experimenta ninguna degradación. En conclusión, el retardo de HARQ-ACK solo tendrá un impacto negativo en la experiencia del usuario si se cumplen dos condiciones: $t_{ACK} > W t_{TB}$ y $NR < SR$. El umbral de retardo ($t_{W,th}$) a partir del cual se degrada el rendimiento se puede

evaluar como:

$$t_{W,th} = \frac{\overline{TB_{size}}W}{SR} \quad (2.11)$$

Mientras el retardo del ACK t_W sea inferior al umbral $t_{W,th}$, el rendimiento del usuario no se verá afectado. De lo contrario, el rendimiento del usuario disminuirá por debajo de SR.

Resultados de simulación

Se ha evaluado el enlace descendente de un eNB con un ancho de banda de 10 MHz (equivalente a 50 PRB) y 6 usuarios en la celda, numerados como 1 - 6 en distancias crecientes a la RRU. Los valores medios de SINR para esos usuarios son 27.8 dB, 22.5 dB, 18 dB, 13.3 dB, 9.7 dB y 4 dB. El promedio de los índices CQI reportados es de 15, 13, 11, 9, 7 y 5, respectivamente. Se ha considerado el modelo de canal Macro Urbano de la UIT (UMa) [43] con una velocidad de usuario de 4 km/h. Hemos considerado un algoritmo de adaptación de enlace de bucle externo (OLLA) [44] para mejorar la selección de MCS en cada TTI. Por lo tanto, el índice MCS instantáneo de cada usuario, así como su tamaño de bloque de transporte, varía a lo largo de la simulación de acuerdo con la SINR instantánea. Los tamaños de bloque de transporte se promedian para cada usuario de forma independiente para obtener su $\overline{TB_{size}}$, que es más grande para usuarios con mejor calidad del canal. Las simulaciones se llevan a cabo a lo largo de 20000 subtramas. Se ha asumido un planificador de paquetes Round Robin (RR) [45], configurado con un tamaño de asignación por usuario y subtrama de 15 PRB; es decir, se pueden programar 3 usuarios por subtrama, cada usuario planificado después de dos subtramas, $t_{rmTB} = 2ms$, si todos los buffers contienen datos.

Se han simulado un conjunto de retardos para el HARQ-ACK: 1, 4, 8, 16 y 24 ms. Además, se ha estudiado la influencia de la tasa de fuente. Primero, asumimos una velocidad de fuente de transmisión de 6 Mbps, caracterizada por paquetes de 1400 bytes cada 1.9 ms. También se han simulado tasas de fuente más bajas de 300 kbps, 950 kbps y 2.6 Mbps (enviando ráfagas de datos cada 2 segundos). Los principales parámetros de simulación se resumen en la Tabla 2.3.

En primer lugar se evalúa el *Net Rate* para cada usuario a partir de la Ecuación (2.9). El efecto de la ventana de transmisión, es decir, el número de procesos HARQ,

Tabla 2.3: Parámetros de simulación por defecto

Parameter	Value
Carrier Frequency	2 GHz
Bandwidth	10 MHz
Transmission Power	43 dBm
Simulation Time	2×10^4 ms
Transmission Mode	SISO
Channel Model	ITU UMa
Mobile speed	4 km/h
Number of users	6
Set of avg. SINRs per user	27,8 dB, 22,5 dB, 18 dB, 13,3 dB, 9,7 dB, 4 dB
Set of avg. CQIs per user	15, 13, 11, 9, 7, 5
Scheduling Policy	Round Robin
Max. allocation per user	15 PRBs
Source rate	6 Mbps, 2,6 Mbps, 950 kbps, 300 kbps
HARQ processes	8
No. of retransmissions	3
Decoding algorithm	SOVA
Link adaptation method	OLLA

se ilustra en la Fig. 2.10 y Fig. 2.11 para $t_{TB} = 1$ ms y $t_{TB} = 2$ ms, respectivamente. Se pueden observar dos regímenes operativos: 1) un régimen donde la *Net Rate* aumenta con W ; y 2) un régimen donde la *Net Rate* es independiente de W . El primer régimen se produce cuando el retardo del ACK, t_{ACK} , es mayor que el tiempo entre dos intervalos de transmisión consecutivos, es decir, $t_{ACK} > W \cdot t_{TB}$. En este caso, si asumimos que no hay errores en la transmisión de datos, cada proceso HARQ se bloquea esperando su mensaje ACK durante $t_{ACK} - W \cdot t_{TB}$ segundos, lo que aumenta el tamaño de la ventana (es decir, la cantidad de procesos HARQ paralelos), mejorando el *Net Rate*. El segundo régimen operativo aparece cuando $t_{ACK} < W \cdot t_{TB}$. En este caso, el retardo del ACK es lo suficientemente pequeño como para evitar el bloqueo en los procesos HARQ. Por lo tanto, el *Net Rate* es máximo para cada usuario, y su valor es el cociente entre el tamaño promedio de TB (que depende de la calidad del canal del usuario) y el tiempo entre dos asignaciones de recursos consecutivas, t_{TB} .

Curiosamente, observamos que el valor de W que divide estas dos regiones tam-

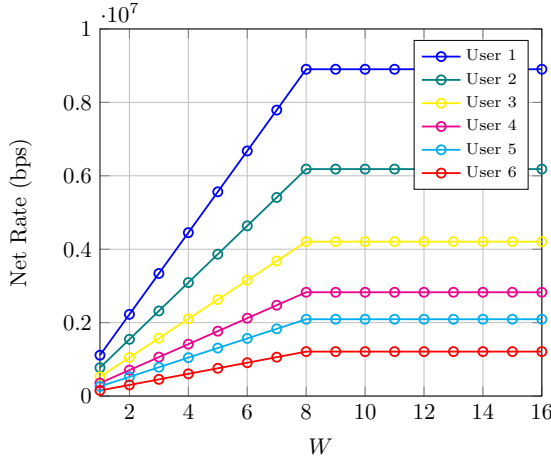


Figura 2.10: *Net Rate* (bps) para $t_{TB} = 1\text{ms}$, $t_{ACK} = 8\text{ ms}$

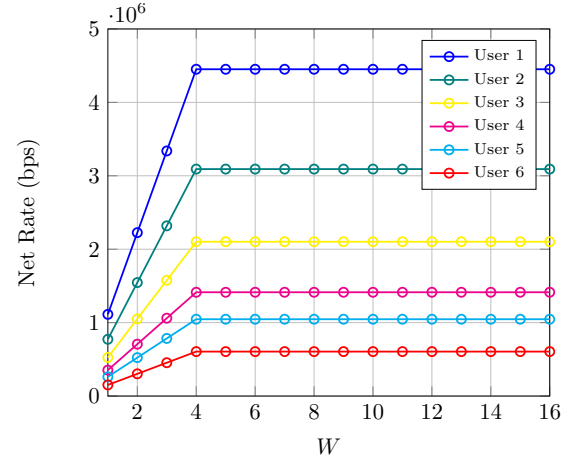


Figura 2.11: *Net Rate* (bps) para $t_{TB} = 2\text{ms}$, $t_{ACK} = 8\text{ ms}$

bién depende de t_{TB} . Recordemos que un valor mayor de t_{TB} significa que la transmisión hacia un usuario determinado ocurre con menos frecuencia, lo que implica que el régimen sin procesos HARQ bloqueados se alcanza con una ventana de transmisión más pequeña, W . Se observa que la región sin procesos bloqueados se alcanza con $W = 8$ para $t_{TB} = 1\text{ ms}$, mientras que se alcanza con solo $W = 4$ para $t_{TB} = 2\text{ ms}$.

Los umbrales de retardo teóricos $t_{W,th}$ según lo evaluado por la Ecuación (2.11) se dan en la Tabla 2.4 para diferentes tasas de fuente y $W = 8$. Esta tabla recopila los $t_{W,th}$ necesarios para lograr una *Net Rate* igual a la tasa de fuente, de modo que un $t_W > t_{W,th}$ causa una degradación del rendimiento del usuario. Bajo la configuración de simulación descrita anteriormente, a los usuarios con mejor calidad de canal se les asignan bloques de transporte más grandes, por lo que pueden resistir mayores retardos. Como se esperaba de la Ecuación (2.11), los requisitos de velocidad de fuente menos estrictos también permiten mayores retardos.

La Fig. 2.12 y 2.13 muestran el *Net Rate* en función del retardo de ACK para dos valores de t_{TB} diferentes. En el primer caso, $t_{TB} = 1\text{ms}$ y, en consecuencia, $W \cdot t_{TB} = 8\text{ms}$, por lo que t_{ACK} no afecta a los usuarios si $t_{ACK} \leq 8\text{ms}$. A partir del retardo de 8 ms, el *Net Rate* disminuye junto con t_{ACK} , siendo más notables para valores de transmisión más altos. Del mismo modo, los cálculos para $t_{TB} = 2\text{ms}$ ($W \cdot t_{TB} = 16\text{ms}$) se ilustran en la Fig. 2.13. Por un lado, el *Net Rate* inicial es la

Tabla 2.4: Umbrales de retardo para usuarios con diferentes tasa de fuente, de acuerdo a la Ecuación (2.11) con $W = 8$ and $t_{TB} = 2ms$

User	6 Mbps	300 kbps	2.6 Mbps	950 kbps
1 (best)	11.6 ms	246.1 ms	26.8 ms	75.5 ms
2	8.1 ms	175.6 ms	18.7 ms	50.7 ms
3	5.6 ms	110.9 ms	12.8 ms	36.1 ms
4	3.8 ms	75.2 ms	8.8 ms	23.5 ms
5	2.7 ms	56.5 ms	6.4 ms	17.8 ms
6 (worst)	1.6 ms	33.0 ms	3.7 ms	9.9 ms

mitad que el mostrado en la Fig. 2.12 debido a que el tiempo entre la asignación de dos recursos se ha duplicado ($t_{TB} = 2ms$). Por otro lado, el retardo en el informe requerido para tener un impacto negativo en el *Net Rate* también se duplica.

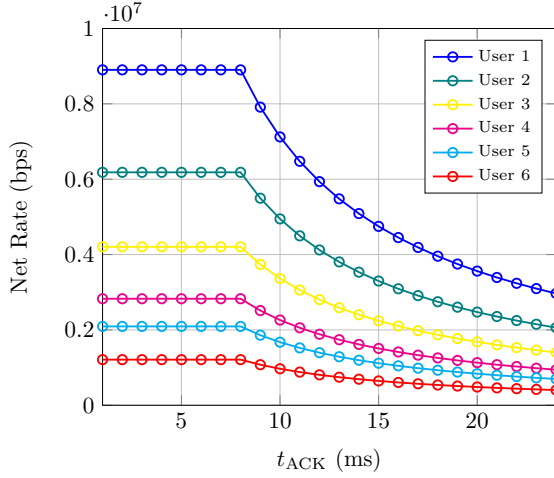


Figura 2.12: *Net Rate* (bps) para $t_{TB} = 1ms$, $W = 8$

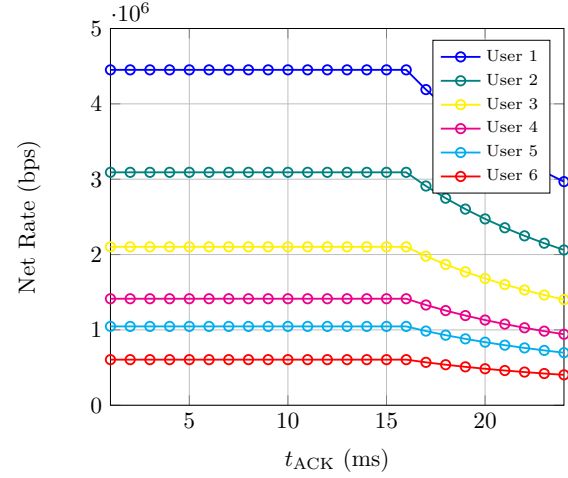


Figura 2.13: *Net Rate* (bps) para $t_{TB} = 2ms$, $W = 8$

Una vez que se han obtenido los resultados teóricos, las siguientes figuras analizan los resultados de simulación para las fuentes descritas anteriormente. Las figuras muestran el rendimiento por usuario a medida que aumenta el retardo en el recorrido de ida (t_{ACK}) debido a una conexión no ideal. Los resultados son diferentes de los anteriores, ya que en este caso el planificador solo asigna recursos a aquellos usuarios que tienen datos en sus colas. Los usuarios capaces de transmitir con bloques de transporte más grandes vacían sus colas antes. Los recursos libres son empleados

posteriormente por aquellos usuarios con peor calidad de canal, lo que reduce el tiempo entre asignaciones de recursos t_{TB} .

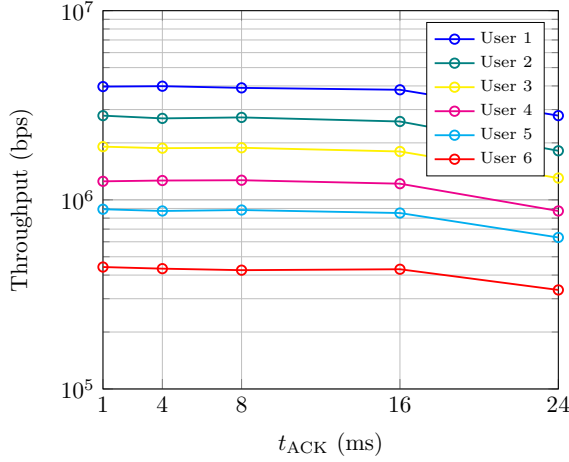


Figura 2.14: Tasa de transmisión por usuario, SR=6 Mbps

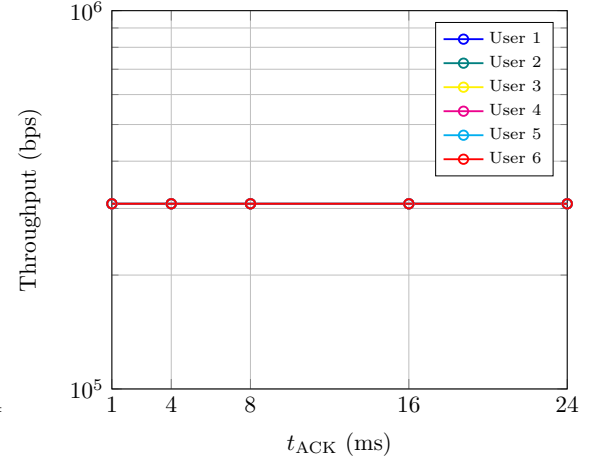


Figura 2.15: Tasa de transmisión por usuario, SR=300 kbps

La Fig. 2.14 muestra los resultados para la tasa de fuente más alta, $SR = 6$ Mbps. De la ecuación (2.10) es evidente que $t_W \approx \max(t_{ACK}, 16\text{ms})$. Los umbrales de retardo, según lo indicado por la Ecuación (2.11) (que se muestra en la Tabla 2.4), son inferiores a 16 ms para todos los usuarios. Por lo tanto, ningún usuario podrá alcanzar su tasa de fuente (es decir, $NR < SR$ para todos los usuarios) y, por lo tanto, el rendimiento experimentará una degradación significativa. Los usuarios 1 y 2 podrían mejorar su rendimiento si el planificador pudiera asignarles recursos a una tasa de subtrama ($t_{TB} = 1\text{ms}$). Sin embargo, los usuarios 3-6 no pueden alcanzar la tasa de fuente debido al hecho de que $t_{W,th}$ está por debajo del mínimo de 8 ms impuesto por el sistema. Para ellos, incluso si t_{ACK} no influye en el rendimiento, la tasa obtenida es más baja que la tasa de fuente, ya que el canal no puede transportar todo el flujo de información de 6 Mbps debido a: 1) la tasa máxima alcanzable; 2) el hecho de que los recursos de transmisión se comparten entre los 6 usuarios; y 3) el efecto de las retransmisiones. Por lo tanto, se obtendrían los mismos resultados (en términos de rendimiento) si se utiliza una tasa de fuente más alta ya que el sistema está trabajando en condiciones de saturación.

Contrariamente al caso anterior, una tasa de fuente de 300 kbps es lo suficiente-

mente lenta para garantizar que todos los usuarios cumplan que $NR > SR$, como se observa en la Fig. 2.15. Los valores calculados para los umbrales de retardo (en la Tabla 2.4) muestran que t_{ACK} debe ser demasiado alto para percibir sus efectos sobre el rendimiento del usuario (33 ms para el UE más débil en términos de calidad radio mientras que se necesitan 246.1 ms para los UEs que reciben una señal de buena calidad).

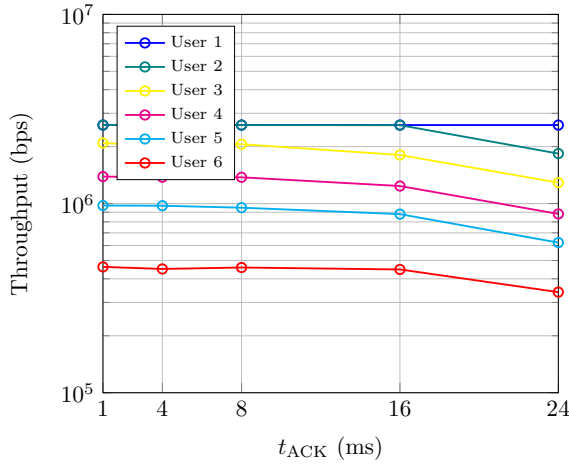


Figura 2.16: Tasa de transmisión por usuario, SR=2.6 Mbps

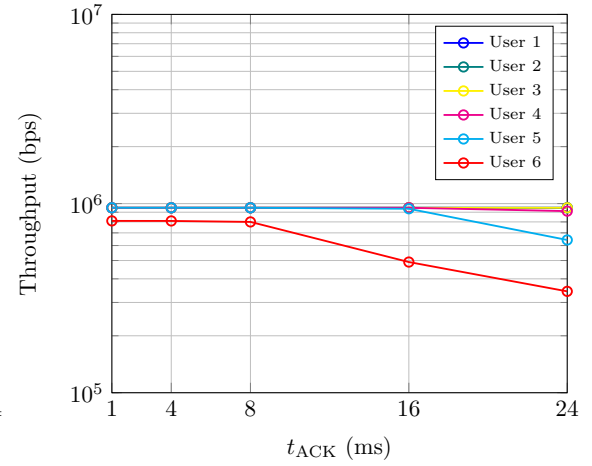


Figura 2.17: Tasa de transmisión por usuario, SR=950 kbps

Los resultados para la velocidad de fuente de 2.6 Mbps se muestran en la Fig. 2.16. Esta tasa de fuente es lo suficientemente alta para que todos los buffers de usuario tengan datos pendientes de transmisión. A este respecto, dado que el número máximo de usuarios programados en el mismo TTI es 3, a cada usuario se le asignan recursos cada 2 ms, lo que lleva a un aumento de los períodos de espera para cada paquete. Los usuarios 1 y 2 alcanzan la velocidad de fuente de 2.6 Mbps; sin embargo, el rendimiento de los usuarios de 3 a 6 es inferior a la tasa de fuente debido a que $NR < SR$. Este es un resultado que se puede contrastar con la Tabla 2.4, donde $t_{W,th}$ es inferior a 16 ms para dichos usuarios (12.8 ms, 8.8 ms, 6.4 ms y 3.7 ms, respectivamente). Los usuarios 4 y 5 podrían mejorar su rendimiento si el planificador pudiera asignarles recursos a ritmo de subtrama (por ejemplo, $t_{TB} = 1$ ms); sin embargo, el valor de $t_{W,th}$ para los usuarios 4 y 5 está por debajo de 8 ms (6.8 ms y 3.7 ms), por lo que nunca alcanzarán una tasa de transmisión de 2.6 Mbps.

El usuario 1 no se ve afectado por retardos inferiores a 26.8 ms (Tabla 2.4), que está fuera del rango de la figura. Los usuarios 2 a 6 experimentan una degradación de su rendimiento cuando $t_{ACK} > 16$ ms, como se indica en la Tabla 2.10.

La Fig. 2.17 muestra los resultados para una tasa de fuente intermedia de 950 kbps por usuario. Los resultados permiten clasificar a los usuarios en tres grupos. Los tres mejores usuarios (etiquetados como 1-3) experimentan una calidad del canal lo suficientemente buena como para mantener su *Net Rate* por encima de la velocidad de la fuente para todos los retardos evaluados, es decir, $NR > SR$. En tal caso, $W \cdot t_{TB} \approx 16$ ms. Por lo tanto, t_{ACK} no tiene un impacto en su rendimiento hasta que alcanza 16 ms. A este valor, cualquier incremento de t_{ACK} reducirá su *Net Rate*. Como se muestra en la Tabla 2.4, el rendimiento de los usuarios 1-3 no se degrada hasta que sus retardos alcanzan los 75.5, 50.7 y 36.1 ms, respectivamente. En contraste, los usuarios 4 y 5 tienen una *Net Rate* más alta que la tasa de fuente $NR > SR$. Sin embargo, el rendimiento de estos usuarios disminuye a medida que t_{ACK} crece más de 23.5 y 17.8 ms, respectivamente. Esto se debe a que el valor de $t_{ACK} > W \cdot t_{TB}$ es lo suficientemente alto como para que $NR < SR$. Para el peor usuario, el tamaño promedio de bloque de transporte es tan bajo que cualquier paquete de capa superior se segmenta en un conjunto de TBs. Por lo tanto, cuando otros usuarios han finalizado su transmisión, este usuario todavía está enviando TBs. Es decir, su t_{TB} es aproximadamente 1 ms porque la mayor parte del tiempo se transmite solo en la celda, por lo que $W \cdot t_{TB} \approx 8$ ms. En consecuencia, su *NR* disminuye si $t_{ACK} > 8ms$. De acuerdo con la Tabla 2.4, su rendimiento disminuye cuando $t_{ACK} > 9,9ms$, puesto que, en ese caso, $NR < SR$.

2.2. Gestión de interferencias

Tradicionalmente, la gestión de interferencias se ha realizado en base a una planificación estática de frecuencias en cada una de las celdas desplegadas, siguiendo algún método que maximice la distancia entre celdas co-canal. Aunque este tipo de técnicas se ha ido empleando desde los mismos inicios de las redes celulares, sigue teniendo mucho potencial debido a que las técnicas coordinadas y las redes heterogéneas ofrecen nuevas posibilidades a este tipo de soluciones. Así, la combinación

de técnicas de planificación estática con técnicas coordinadas puede relajar el número de celdas cooperantes. Al reducir la interferencia también se puede reducir la cantidad de información a intercambiar obteniendo las mismas prestaciones.

Tradicionalmente, la planificación estática ha considerado patrones regulares en la distribución espacial de los puntos de acceso. Si además se considera el caso de las redes heterogéneas en la que hay distintos niveles de puntos de acceso con distintas densidades de puntos y distintas potencias de transmisión, aparecen nuevos grados de libertad a la hora de diseñar algoritmos de planificación que pueden ser explotados para aumentar las prestaciones.

En esta sección se estudiará el problema de la gestión de interferencias sobre redes heterogéneas, con especial énfasis en el análisis de técnicas de control de potencia en femtoceldas o picoceldas que comparten los recursos con macroceldas superpuestas (cuyos puntos de acceso suelen utilizar mayor potencia de transmisión). Se evaluarán distintas técnicas orientadas a la reducción de las interferencias provocadas por la celda agresora sobre los terminales conectados a la celda víctima.

Concretamente, el estudio comenzará por el análisis de técnicas de gestión coordinada de interferencias entre celdas (enhanced Inter-Cell Interference Coordination, eICIC) en el dominio del tiempo.

En primer lugar, se analizarán las técnicas de reutilización fraccional de frecuencias (FFR), poniendo especial énfasis en la imparcialidad entre usuarios.

En segundo lugar se analizarán distintos esquemas de transmisión coordinada entre puntos de acceso para reducir las interferencias de los terminales que se encuentran en las fronteras de las celdas.

En tercer y último lugar, se evaluará la técnica de Expansión del Rango de la Celda (CRE) en los que se juega con las potencias de transmisión de las celdas pequeñas para captar a usuarios del borde.

2.2.1. Reutilización Fraccional de Frecuencias (FFR)

Las redes celulares están diseñadas para soportar patrones agresivos de reutilización de frecuencias con el fin de maximizar la eficiencia espectral. Sin embargo, este tipo de planificación de frecuencia conduce a un aumento considerable de la interferencia inter-celda (ICI), lo que puede causar una importante degradación del

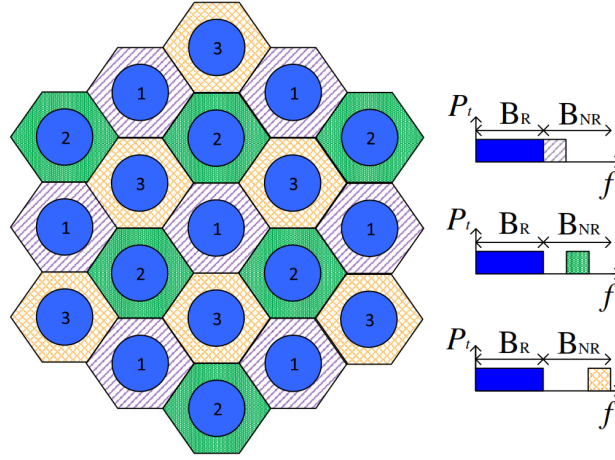


Figura 2.18: Ejemplo de topología celular con FFR

rendimiento, especialmente para los usuarios ubicados en el borde de la celda.

Las técnicas de Coordinación de Interferencias entre Celdas (ICIC) [46] ha sido ampliamente investigada como una tecnología clave para aliviar el impacto de la interferencia. Entre las técnicas existentes, este apartado se centra en la reutilización fraccional de frecuencias (FFR). Estos esquemas apuntan a reducir la interferencia en el borde de la celda aplicando un patrón de reutilización de frecuencia más flexible a los usuarios del borde de la celda, reduciendo así la interferencia para dichos usuarios [47]. Sin embargo, la alta eficiencia se mantiene mediante un patrón agresivo de reutilización 1 para aquellos usuarios con una relación alta de señal a interferencia más ruido (SINR), que generalmente se encuentra cerca de la estación base (BS).

En LTE-A, el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) facilita el uso de esquemas FFR ya que toda la banda se puede dividir de manera bastante sencilla en dos patrones de reutilización diferentes. La Fig. 2.18 muestra un ejemplo de escenario FFR: una subbanda de frecuencia común, B_R , se emplea en todas las celdas (es decir, con una reutilización de frecuencia 1) mientras que el uso de la banda restante, B_{NR} , se coordina entre las celdas vecinas para crear subbandas con una reutilización de frecuencia superior a 1 (comúnmente 3) [47].

Uno de los objetivos de FFR es brindar un tratamiento más justo a los usuarios ubicados en el borde de las celdas. Pocos son los trabajos sobre FFR que abordan el problema de la imparcialidad entre usuarios. Ciertamente se muestra en [48], donde

se analiza el rendimiento del peor usuario para un algoritmo FFR. El rendimiento de una planificación oportunista sobre un esquema FFR se evalúa en [49], considerando los requisitos de imparcialidad de los usuarios. En [47], se evalúan todas las posibles asignaciones de ancho de banda para la reutilización 1 y 3. Sin embargo, estos trabajos no permiten una comparación fácil entre las técnicas de asignación.

Para evaluar la imparcialidad en términos de tasa de transmisión por usuario, se pueden considerar varias métricas. El conocido índice de Gini [50], originalmente propuesto para estudiar la desigualdad en economía, es capaz de captar la imparcialidad general de la distribución y también se propuso para estudiar la imparcialidad de los planificadores en Internet [51].

En este trabajo consideramos un sistema con un número arbitrario P de celdas. Una de las celdas será la celda observada, mientras que las $P - 1$ celdas restantes se tratarán como celdas interferentes. Se utiliza un método FFR como el de la Fig. 2.18. El ancho de banda total disponible del sistema B se divide en cuatro bandas de frecuencia ortogonales no superpuestas indicadas por B_R , B_{NR1} , B_{NR2} y B_{NR3} , cumpliendo que $B = B_R + B_{NR}$ y $B_{NR} = B_{NR1} + B_{NR2} + B_{NR3}$. B_R representa el ancho de banda disponible para la región 1 de reutilización y B_{NRi} (donde $i \in [1, 2, 3]$) son tres conjuntos de subbandas de igual tamaño que representa el ancho de banda disponible para la región 3 de reutilización; cada una de estas subbandas se asignará a las celdas de una manera que ninguna otra celda circundante está utilizando la misma subbanda, como en una planificación clásica de frecuencias.

En la celda observada consideramos N usuarios, cada uno de ellos con una ubicación asociada s_k , $k \in [1..N]$. La SINR media asociada al usuario k^{th} depende de la región de la celda específica (reutilización 1 o 3) a la que el usuario ha sido asociado. De manera genérica, la SINR media asociada al usuario k^{th} , $SINR_k$, será igual a $SINR^{R1}(s_k)$ si se encuentra en la región de reutilización 1 o será $SINR^{R3}(s_k)$ si se encuentra en la región de reutilización 3. $SINR^{R1}$ y $SINR^{R3}$ representan la SINR media asociada con las regiones de reutilización 1 y 3, respectivamente.

Definimos la tasa de transmisión potencial, r_{0k} , asociada al usuario k^{th} como la tasa de transmisión alcanzable por el usuario k si todos los recursos disponibles estuviesen asignados a él. Dado que r_{0k} es una función de la SINR media asociada al usuario, r_{0k} puede tener diferentes valores dependiendo de la región de la celda a

la que está asociado el usuario. Específicamente, si el usuario k está asociado a la región de reutilización 1, r_{0k} será igual a $c(SINR^{R1}(s_k))$, mientras que si está en la región de reutilización 3, r_{0k} será igual a $\frac{1}{3}c(SINR^{R3}(s_k))$.

El objetivo es encontrar una clasificación óptima que conduzca a una tasa de transmisión máxima para cada usuario. Esto es equivalente a encontrar un umbral de SINR óptimo, ya que r_{0k} depende de la SINR media asociada al usuario. Por lo tanto, la siguiente expresión se aplicará para clasificar a los usuarios:

$$\text{If } c(SINR^{R1}(s_k)) < \frac{1}{3}c(SINR^{R3}(s_k)), k \in U^{R3} \Rightarrow r_{0k} = \frac{1}{3}c(SINR^{R3}(s_k)) \quad (2.12)$$

donde U^{R1} y U^{R3} representan el conjunto de usuarios asociados a las regiones de reutilización 1 y 3, respectivamente.

Planificación de recursos radio

Sea ρ_k la fracción de los recursos (ancho de banda y tiempo) asignados al usuario k^{th} ; se debe cumplir la siguiente restricción si todos los recursos disponibles se asignan a los usuarios: $\sum_{k=1}^N \rho_k = 1$. Además, si consideramos una implementación basada en FFR, se deben tener en cuenta las dos siguientes restricciones adicionales para dimensionar adecuadamente las bandas de frecuencia de reutilización 1: $B_R/B = \sum_{k \in U^{R1}} \rho_k$, y reutilización 3: $B_{NR}/B = \sum_{k \in U^{R3}} \rho_k$, según la distribución de usuarios dentro de cada región.

La cantidad real de recursos asignados a un usuario depende de la política de planificación seleccionada, es decir, el valor de ρ_k . Por lo tanto, la tasa de transmisión asignada al usuario k se puede calcular como $r_k = \rho_k \cdot r_{0k}$. Teniendo en cuenta la definición anterior, la tasa agregada de la celda, R_N , está determinada por la política de planificación concreta y se puede calcular como $R_N = \sum_{k=1}^N r_k = \sum_{k=1}^N \rho_k \cdot r_{0k}$.

Con respecto a la política de planificación específica que determina el valor de ρ_k , se pueden aplicar muchos esquemas diferentes, algunos de ellos se describen a continuación:

- *Equal Resource Sharing (ERS)*: Los recursos tiempo/frecuencia se compar-

ten de forma equitativa entre los usuarios independientemente de su tasa de transmisión potencial, es decir, $\rho_k = 1/N$. Por lo tanto, la tasa agregada de transmisión es $R_N^{ERS} = 1/N \sum_{k=1}^N r_{0k}$, debiendo satisfacer que $B_R/B = N^{R1}/N$ y $B_{NR}/B = N^{R3}/N$ donde N^{R1} y N^{R3} es el número de usuarios asignados a las bandas de reutilización 1 y 3, respectivamente.

- *Equal Transmission Rate (ETR)*: La asignación de recursos es inversamente proporcional a las tasas potenciales de transmisión de los usuarios (es decir, se asignan más recursos a los usuarios con SINR más baja), de modo que las tasas de transmisión reales se distribuyen por igual entre los usuarios, es decir, $\rho_k = K_1/r_{0k}$, donde $K_1 = \left(\sum_{k=1}^N 1/r_{0k} \right)^{-1}$ para satisfacer la restricción de asignación de recursos. En este caso, la tasa agregada se puede calcular como $R_N^{ETR} = N \cdot K_1$ y la proporción entre las bandas de frecuencia 1 y 3 deberán satisfacer $B_R/B = 1/N \cdot \sum_{k \in U^{R1}} R_N^{ETR}/r_{0k}$ y $B_{NR}/B = 1/N \cdot \sum_{k \in U^{R3}} R_N^{ETR}/r_{0k}$, respectivamente.
- *Truncated-ETR*: Esta es una versión modificada de la política anterior que considera un valor máximo de ρ_k para evitar asignar demasiados recursos a los usuarios que reciben con una SINR muy baja, es decir: $\rho_k = K_2 \cdot \min\{K_1/r_{0k}, \varepsilon/N\}$, donde $K_2 = \left(\sum_{k=1}^N \min\{K_1/r_{0k}, \varepsilon/N\} \right)^{-1}$ y $\varepsilon \in [0, \infty]$ es un factor de truncamiento con respecto al esquema ERS. ε/N significa que los usuarios con una SINR pobre obtendrán un máximo de ε veces los recursos que se les asignaría si se utilizara un esquema ERS. Al variar el valor de ε , este esquema puede comportarse de manera muy diferente. De hecho, la tasa agregada $R_N^\varepsilon = K_2 \sum_{k=1}^N \min\{R_N^{ETR}/(N \cdot r_{0k}), \varepsilon/N\}$ estará dentro de los límites de algoritmos anteriores: $R_N^{ETR} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} R_N^\varepsilon \leq R_N^\varepsilon \leq \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} R_N^\varepsilon = R_N^{ERS}$.

Indicador de imparcialidad entre usuarios

El análisis de la imparcialidad implica el estudio de la distribución de la cantidad de recursos (ancho de banda y tiempo) asignados a cada usuario. Sin embargo, como las diferentes SINR conducen a una tasa potencial distinta, en este apartado se

analiza la tasa de transmisión asignada (en lugar de los recursos asignados) mediante la curva de Lorenz y el índice de Gini [50].

Sea $\langle r_k, k = 1 \cdots N \rangle$ el conjunto ordenado de tasas asignadas a los usuarios bajo cierta política de planificación. La tasa acumulada por los primeros n de esos usuarios viene dada por $R_n = \sum_{k=1}^n r_k$.

La curva de Lorenz (ver Fig. 2.19 a)) muestra, en el eje x, el porcentaje del número acumulado de usuarios normalizado al número total de usuarios, n/N , mientras que en el eje y muestra la tasa acumulada de esos n usuarios normalizado a la tasa agregada, R_n/R_N . La recta a 45° representa la igualdad perfecta en el coeficiente de Gini de tasa asignada. El índice de Gini se puede considerar como la proporción del área que se encuentra entre la línea de igualdad y la curva de Lorenz sobre el área total debajo de la línea de igualdad. Este coeficiente puede variar de 0 (igualdad perfecta) a 1 (desigualdad máxima).

La curva de Lorenz se puede generalizar utilizando el valor no normalizado de R_n en el eje y, dando como resultado la Fig. 2.19 b). Como se verá en la siguiente sección, esta representación puede mostrar el intercambio de la tasa asignada entre usuarios aventajados y desfavorecidos para ciertos valores de ε .

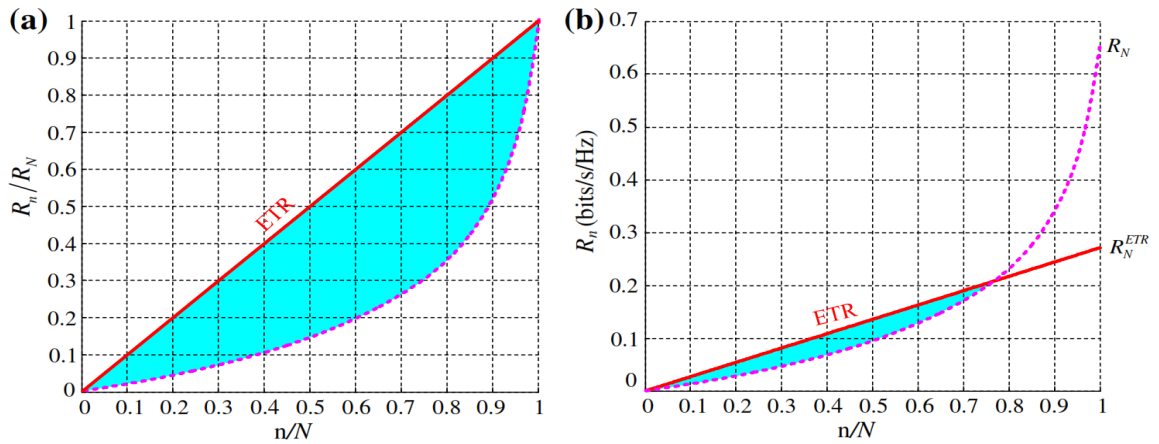


Figura 2.19: a) Curva de Lorenz, b) Curva de Lorenz generalizada

Resultados

Se considera el enlace descendente de una red celular LTE-A con 61 celdas hexagonales de radio $R=1$ km. Suponemos que las BS utilizan antenas omnidireccionales ubicadas en los centros de las celdas y con la misma potencia de transmisión, $P_t = 49$ dBm. El escenario asumido es un área urbana densa servida por macroceldas. Hay una cantidad de usuarios distribuidos aleatoriamente en la celda observada cuyas posiciones son variables aleatorias distribuidas uniformemente en la celda.

La señal recibida por los usuarios de la celda observada sufre pérdidas de propagación según la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} 98,42 + 20\log_{10}(d) & \quad \text{if } d < 0,5 \text{ km} \\ 140,35 + 38\log_{10}(d) & \quad \text{if } 0,5 \leq d < 1 \text{ km} \\ 140,36 + 35,04\log_{10}(d) & \quad \text{if } d \geq 1 \text{ km} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Se considera la existencia de desvanecimientos a pequeña escala que siguen un modelo de Rayleigh. Además, para facilitar la evaluación numérica, hemos considerado que la interferencia recibida del resto de las celdas en el sistema sigue una distribución gaussiana [49] y su intensidad de señal solo se ve afectada por las pérdidas de propagación. Por simplicidad, suponemos que el sistema está limitado por interferencia.

Para determinar la tasa de transmisión potencial, hemos tenido en cuenta las restricciones establecidas en un sistema LTE-A. En tales sistemas, AMC se emplea para maximizar el rendimiento mientras se mantiene la tasa de error de bloque (BLER) bajo un objetivo predefinido ($BLER_t$). Este objetivo se puede lograr seleccionando el MCS óptimo sujeto a la $BLER_t$, que se asume 0.1 en este trabajo, entre un conjunto de 16 posibles esquemas. Por lo tanto, la tasa de transmisión puede calcularse considerando la probabilidad de usar cada canal MCS dada una SINR media. Suponiendo que el MCS i se asocia con una tasa de modulación de b_i bits/símbolo y una tasa de codificación c_i , la tasa de datos efectiva cuando se usa MCS i se puede calcular como $r_i = b_i \cdot c_i$. En un canal con desvanecimiento Rayleigh, la probabilidad de seleccionar un MCS i en particular viene dada por:

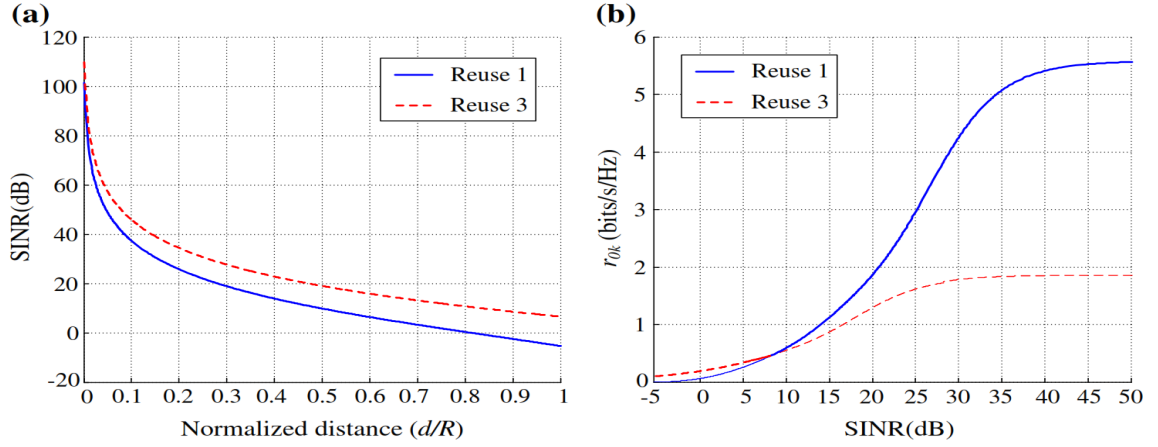


Figura 2.20: a) SINR, b) Tasa de transmisión potencial

$$p_i = \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{i+1}}{\bar{\gamma}}\right). \quad (2.14)$$

donde γ_i y γ_{i+1} son los umbrales de SINR inferior y superior asociados al MCS i , respectivamente; y $\bar{\gamma}$ es la SINR media. A continuación, se puede obtener r_{0k} promediando las tasas de transmisión individuales para cada MCS: $r_{0k} = \sum_{i=0}^{15} r_i \cdot p_i$.

La Fig. 2.20 a) representa la evolución de la SINR asociada a cada región en función de la distancia normalizada entre un usuario y la BS en la celda observada. Se puede ver que $SINR^{R3}$ siempre es mayor que $SINR^{R1}$. En la Fig. 2.20 b) se puede ver cómo se logra la reducción del nivel de interferencia a costa de reducir la tasa alcanzable en esta región (línea discontinua). Como se indica en (2.12), se puede ver que la forma de maximizar la tasa potencial es seleccionar el valor más alto de ambas expresiones en cada SINR. Debe observarse que el umbral de SINR que conduce a la máxima tasa potencial para cada usuario es el mismo independientemente de la política de planificación seleccionada y se puede ver en la Fig. 2.20 b) que tiene un valor de 9.3 dB. En este caso, dado que no se considera el efecto del *shadowing*, el umbral de SINR es equivalente al umbral de distancia, X_f , con un valor de $0.515R$. Esto significa que las regiones de reutilización 1 y 3 pueden ser renombradas como región interna y externa, respectivamente [47].

Una vez que se haya establecido el umbral óptimo de SINR, vamos a analizar el rendimiento del sistema bajo las tres políticas consideradas. La Fig. 2.21 muestra la

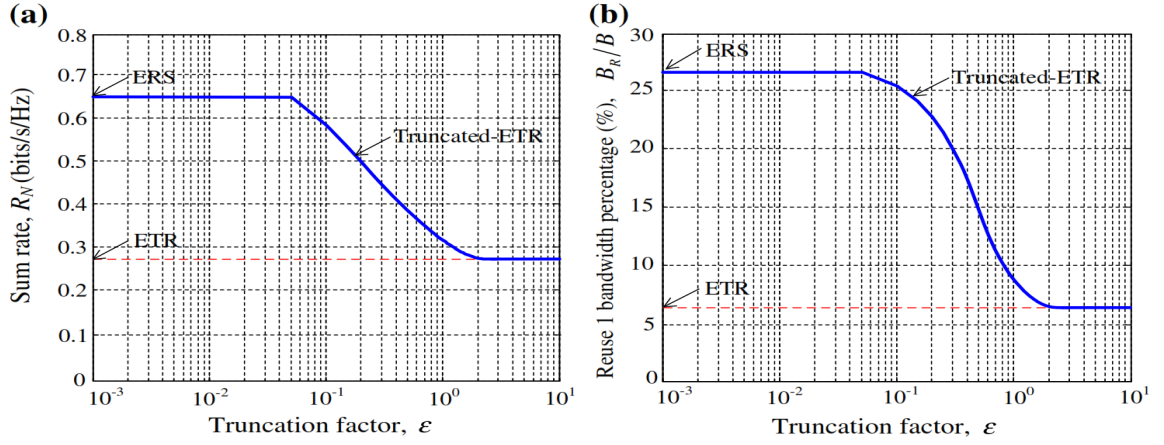


Figura 2.21: a) Tasa de transmisión alcanzable por el sistema, b) Partición del ancho de banda del sistema

tasa de transmisión alcanzable (2.21 a)) y la división del ancho de banda del sistema (2.21 b)) en función del parámetro ε . Se puede ver en la Fig. 2.21 a) que el valor de la tasa agregada para la estrategia ERS es mayor que la asociada a ETR. Además, en la Fig. 2.21 b), se observa que la política ETR asigna casi el 95 % del ancho de banda para usuarios de la banda de reutilización 3, mientras que la estrategia ERS asigna más del 25 % del ancho de banda para los usuarios de la banda de reutilización 1.

El índice de Gini asociado a la política ETR truncada en función del parámetro ε y en función de la tasa agregada se muestra en la Fig. 2.22. Se puede ver en la Fig. 2.22 a) cómo aumenta el índice de Gini a medida que disminuye el valor de ε . Esto se debe a que, a medida que disminuye ε , ciertos recursos se transfieren de usuarios con menores tasas potenciales r_{0k} a otros cuyo uso es más eficiente, lo que aumenta las desigualdades entre ellos. Finalmente, cuando $\varepsilon \rightarrow 0$, la política ETR truncada asigna a todos los usuarios la misma cantidad de recursos, pero aquellos con SINR más alta lo explotan de una manera más eficiente. Por lo tanto, la política ERS logra una mayor tasa agregada R_{ERS} a costa de lograr una mayor injusticia entre los usuarios.

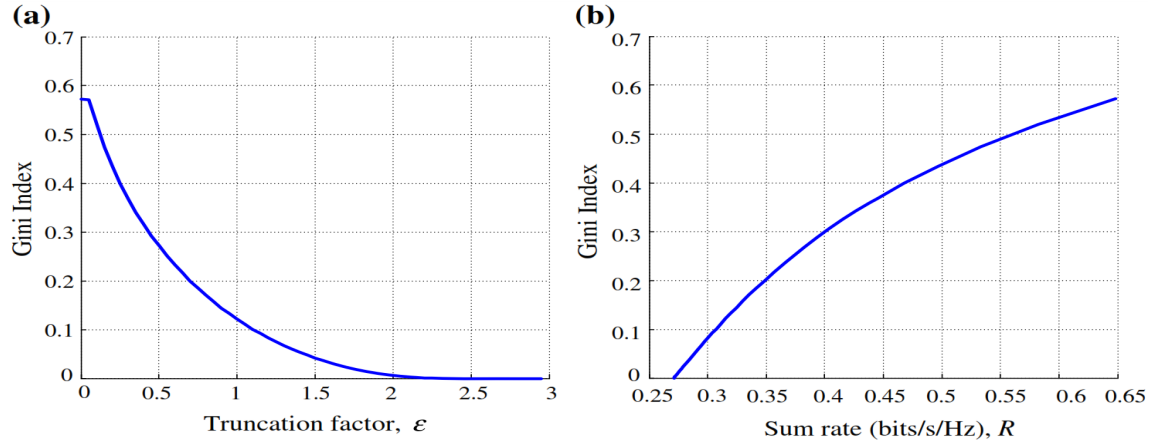


Figura 2.22: Evolución del índice de Gini (ETR truncado) vs. factor de truncamiento, b) Tasa total de transmisión

2.2.2. Técnicas de transmisión coordinadas multipunto (CoMP)

Las técnicas de transmisión coordinadas multipunto (CoMP) suponen una de las propuestas más novedosas para la tecnología LTE-Advanced. CoMP puede considerarse como un sistema de múltiples antenas (MIMO) distribuido, en el que los nodos distribuidos geográficamente forman múltiples antenas y cooperan para transmitir y/o recibir información. El objetivo es aumentar el rendimiento del sistema, especialmente en el borde de la celda, donde la interferencia inter-celda (ICI) suele ser alta.

Esta sección se centra en dos técnicas de transmisión coordinada que se utilizan para aumentar el rendimiento del sistema, con el objetivo de evaluar su rendimiento para las comunicaciones M2M a través del enlace descendente de un sistema LTE-A.

La primera técnica considerada es la transmisión conjunta (JT) [12] sin precodificación, donde un NodeB evolucionado (eNB) y una unidad radio remota (RRU) colaboran para transmitir datos de forma conjunta a uno o más UEs.

La segunda técnica estudiada es la Reutilización de Frecuencia Parcial (PFR), donde las células adyacentes deben coordinarse para dividir todo el ancho de banda en dos patrones de reutilización (reutilización 1 y 3) [13-14].

PFR mejora el proceso de recepción de los usuarios al evitar que interfieran. La Fig. 2.23 (izquierda) muestra el escenario PFR considerado: el ancho de banda

B total del sistema disponible se divide en dos bandas de frecuencia ortogonales no superpuestas indicadas por B_{center} y B_{edge} . B_{center} representa el ancho de banda disponible para los usuarios cerca del eNB y B_{edge} se divide en tres conjuntos de subbandas de igual tamaño que representan el ancho de banda disponible para los usuarios de borde de celda; cada una de estas subbandas se asignará a las celdas de manera que ninguna otra celda circundante esté utilizando la misma subbanda. De esa manera, cada celda utiliza el espectro B_{center} para atender a los usuarios del centro de la celda y un tercio del espectro de B_{edge} para atender a los usuarios de la celda. Esta asignación de frecuencia garantiza que los usuarios de borde de celda no recibirán interferencia de las celdas vecinas más cercanas porque a estas celdas se les asignan diferentes sub-bandas de frecuencia para su transmisión en esa región. Esta reducción en el nivel de interferencia se logra a costa de reducir la cantidad de ancho de banda asignable por celda (solo se utiliza un tercio de B_{edge} en cada celda).

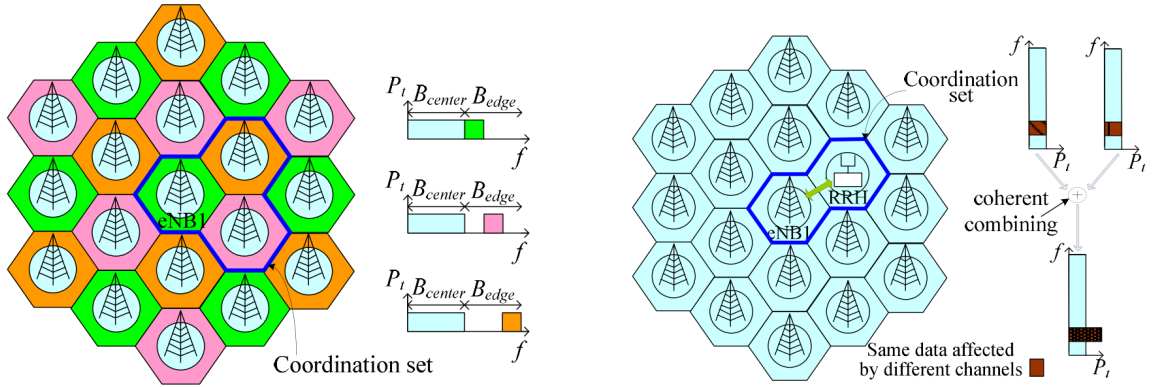


Figura 2.23: Topología celular de un esquema PFR (izquierda) y Transmisión Conjunta (JT) en transmisión (derecha)

A diferencia de la técnica anterior, la técnica de transmisión conjunta (JT) sin precodificación intenta explotar el hecho de que un usuario recibe señales de celdas adyacentes. De hecho, esta técnica consiste en transmitir la misma información simultáneamente desde diferentes eNBs para mejorar el proceso de recepción. Esta información debe combinarse coherentemente en el receptor móvil. La Fig. 2.23 (derecha) muestra el proceso realizado cuando se aplica esta técnica. Como puede verse, los mismos recursos de frecuencia de la celda adyacente están dedicados a la

transmisión de la misma información a los usuarios de borde de celda. Esto significa que la capacidad de estos recursos de frecuencia se divide por el número de entidades involucradas en el proceso de JT. Por lo tanto, es importante decidir qué usuarios se consideran en la región del borde de la celda para evitar el uso de esta técnica por parte de usuarios cuyo proceso de recepción no está limitado por interferencias. Esta decisión se puede tomar en base a la potencia media recibida de la celda que le da servicio y de las otras celdas. Si ambos valores son similares, significa que el usuario está en el borde de la celda. De lo contrario, el usuario está cerca del eNB y las interferencias no afectan significativamente al proceso de recepción.

La eficiencia de esta técnica depende de si las señales provenientes de diferentes celdas se suman en fase o en contrafase (ya que no se supone una precodificación). En el peor de los casos, la adición puede ser destructiva y la señal recibida será nula. De todos modos, la recepción mejorará a medida que aumente el número de celdas transmisoras.

Cabe señalar que las celdas vecinas deben coordinarse en ambas técnicas, pero el grado de coordinación es muy diferente en cada caso. Por un lado, en la técnica PFR, las celdas adyacentes deben coordinarse para definir las bandas de frecuencia no superpuestas, B_{center} y B_{edge} , y para decidir qué subbanda pueden usar cada una. Sin embargo, este intercambio de información se realiza típicamente en un tiempo de gran escala (es decir, varios días). Por otro lado, debe existir una coordinación perfecta entre las celdas adyacentes cuando se aplica la técnica JT, ya que las entidades coordinadas deben conocer, no solo los recursos de frecuencia asignados a cada usuario de borde de celda, sino también los datos que deben transmitirse.

Resultados de simulación

Se considera el enlace descendente de una red celular LTE con 61 celdas hexagonales de radio 0.5 km. Todos los eNBs utilizan la misma potencia de transmisión. Un resumen de los parámetros de simulación se muestra en la Tabla 2.5.

Se han simulado 10 usuarios distribuidos aleatoriamente en la celda observada. Cada uno de ellos recibe tráfico generado mediante un modelo de fuente de cámara de video IP [52], que corresponde a una aplicación M2M de control remoto sensible al retardo. Se considera que un usuario está en el área del borde de la celda siempre que

Tabla 2.5: Parámetros de simulación

LTE Parameter	Value/Mode
Number of cells	61
Cell radius	500 m
Number of antennas	Single antenna at eNBs and UEs
Transmit power of eNBs	49 dBm
Path loss model	Hata model [13]
Multipath model	Rayleigh fading
Mobile Speed	4km/h (pedestrian)
Channel bandwidth	20 MHz
OFDM symbols per TTI	14
PRB size	12 subcarriers
Carrier frequency	2.5 GHz
Modulation schemes	QPSK, 16QAM and 64QAM
Target BLER	10%
Number of users	10
Simulation length	20s
Type of traffic	M2M

la diferencia entre la potencia recibida de la celda observada y de las celdas adyacentes sea inferior a 5 dB. Este valor se ha elegido para garantizar que la cooperación solo se aplique a los usuarios que tienen condiciones de canal muy malas. En la técnica PFR, el tamaño de B_{edge} se determina proporcionalmente al número de usuarios de borde. En la técnica JT, este proceso no es necesario ya que no se realiza ninguna división de ancho de banda.

Los resultados se asocian a tres casos de estudio: 1) no se aplica ninguna técnica, es decir, se trata de una red celular con un factor de reutilización 1 (denominado *baseline*), 2) técnica JT sin precodificación y 3) técnica PFR.

La Fig. 2.24 muestra la SINR media asociada a usuarios de borde (líneas rojas) y usuarios de centro (líneas azules) para los tres casos de estudio. Los niveles de SINR se presentan para diferentes valores de incremento de potencia de transmisión en el eNB, definidos como:

$$\Delta P_{Tx} = P_{Tx} - P_n - Lp_{\max}[\text{dB}] \quad (2.15)$$

donde Lp_{\max} corresponde a la pérdida de propagación en el borde de la celda, P_n es la potencia de ruido y P_{Tx} es la potencia de transmisión. Se puede ver que para

valores bajos de potencia de transmisión, la SINR está dominada por la potencia de ruido. A medida que ΔP_{Tx} aumenta (por encima de 20 dB), la SINR está dominada por la interferencia. Finalmente, los valores medios de SINR se saturan porque el efecto de aumentar la potencia de señal deseada compensa el aumento de potencia de la señal interferente.

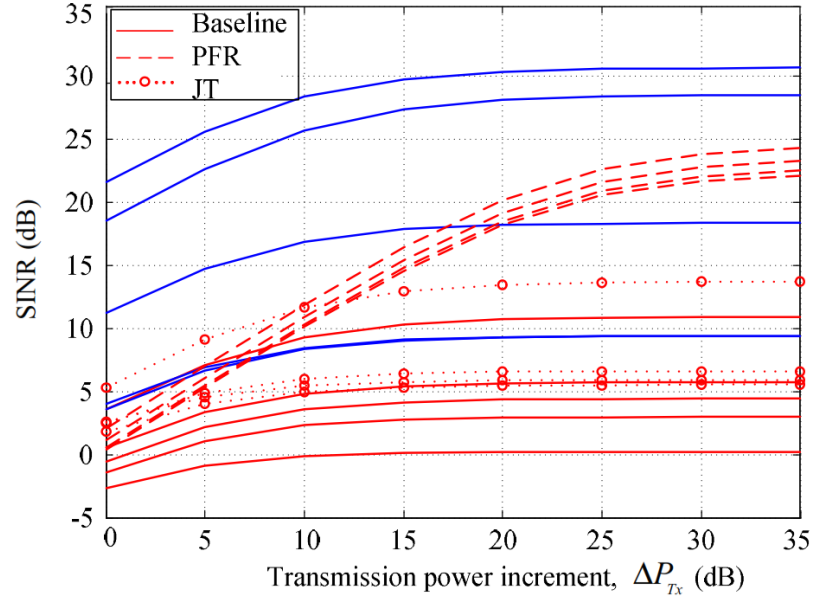


Figura 2.24: SINR media por usuario (usuario del borde de la celda en color rojo)

La Fig. 2.25 muestra los resultados de retardo medio de paquete en la celda observada (izquierda) y el retardo medio de paquete para los usuarios del borde de la celda (derecha). Se puede observar que el retardo medio de la celda es esencialmente el mismo tanto para la configuración de referencia como para la técnica JT, mientras que el retardo para los usuarios de borde se reduce ligeramente. Por otro lado, PFR mejora los resultados de retardo para la mayoría de los valores de ΔP_{Tx} . Solo para los valores más bajos de ΔP_{Tx} , los resultados son bastante similares porque en este punto la SINR de los usuarios en el borde de la celda es bastante similar.

La Fig. 2.26 presenta una comparación de la tasa media de transmisión del usuario en la celda completa (izquierda) y en el borde (derecha). Vale la pena notar que dicha tasa es ligeramente peor para la técnica JT que para la configuración de referencia. Esto es así porque la celda adyacente tiene menos recursos para compartir debido al

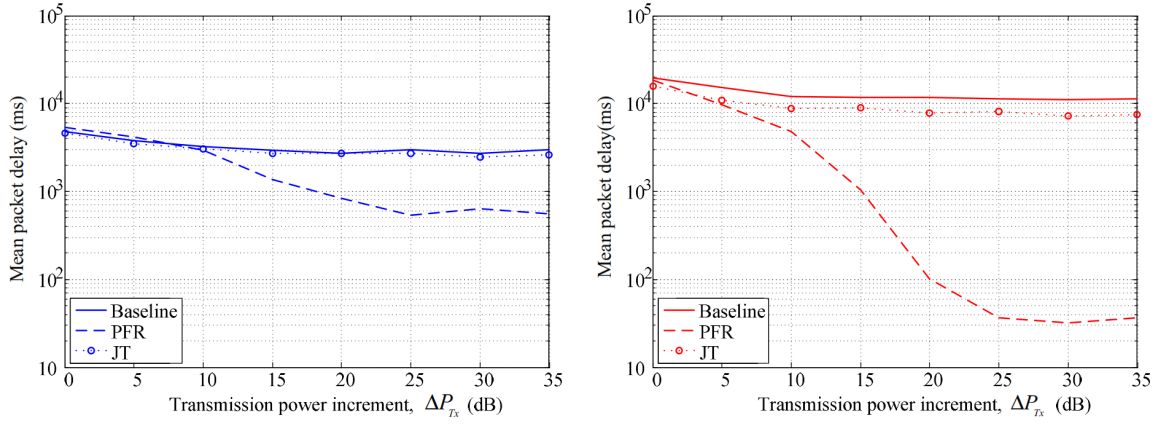


Figura 2.25: a) Retardo medio de paquete en toda la celda, b) Retardo medio de paquete para los usuarios del borde de la celda

uso de JT. Solo es aconsejable el uso de JT cuando la tasa de transmisión del usuario aumenta más del doble. Este es en realidad un criterio de decisión más exigente que un umbral de potencia de 5 dB. Sin embargo, el interés de esta técnica proviene de la mejora del rendimiento de los usuarios del borde, como se puede ver en la figura de la derecha. En particular, la ganancia a 20 dB es del 64 %, mientras que la pérdida relativa en el rendimiento medio de los usuarios es del 5 %. Además, se observa que los resultados para la técnica PFR supera a los de JT y la referencia para valores medios y altos de ΔP_{Tx} . Cabe señalar que el uso de PFR tiene un equilibrio entre la imparcialidad entre usuarios y el rendimiento del sistema.

2.2.3. Expansión del Rango de la Celda (CRE)

A la hora de realizar la asociación entre usuarios (UEs) y estaciones base (BSs) se pueden tener en cuenta distintos criterios. Típicamente se consideran dos posibles criterios: 1) pérdidas de propagación mínima; 2) mayor potencia media recibida. Si se elige este último cuando se tiene un escenario heterogéneo, es posible aplicar un incremento (sesgo) sobre la potencia de transmisión de las celdas pequeñas (*Small-cell Base Stations*, SBSs) de manera que se amplíe su área de cobertura. Esta técnica, conocida como Expansión del Rango de la Celda (*Cell Range Expansion*, CRE) [53], consigue reducir la carga asociada a las celdas grandes (*Macro-cell Base Stations*,

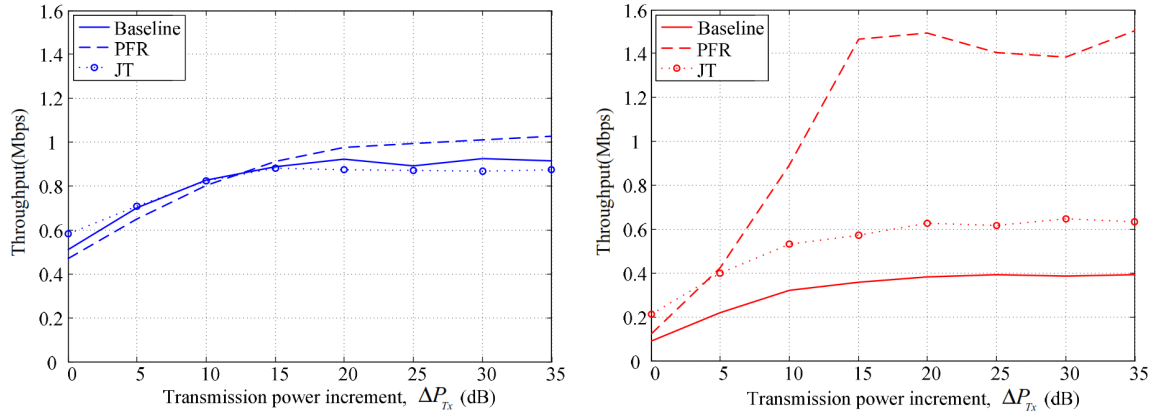


Figura 2.26: a) Tasa media de transmisión en toda la celda, b) Tasa media de transmisión para los usuarios del borde de la celda

MBSs) puesto que al aplicar el sesgo se fuerza a que UEs que estarían asociados a una MAP se asocien a una PAP. Ahora bien, estos usuarios forzados (CRE UEs), suelen tener unos valores de nivel de señal a interferencia (SINR) muy degradados debido a que la MAP a la que estarían asociados de forma natural actúa ahora como interferente.

A continuación se muestran los resultados mediante simulación de un escenario compuesto por 4 SBSs ubicados dentro del área de cobertura de una MBS. El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la asociación de los usuarios en el rendimiento del sistema cuando se aplica la técnica CRE. Los parámetros de simulación se detallan en la Tabla 2.6.

El escenario de simulación consta de una MBS con cuatro SBS colocadas dentro de su área de cobertura. El área de cobertura de la MBS es de forma hexagonal con un radio interior de 250 m. Los SBS se ubican alrededor de la MBS a 0° , 90° , 180° y 270° en coordenadas polares, estando la MBS en el origen de coordenadas. Se analiza el efecto de la distancia entre MBS y SBS en un entorno urbano, es decir, desde una ubicación cercana a la MBS a una ubicación cerca del borde de la celda. En particular, las distancias tomadas en cuenta son 40, 100 y 160 m, denominados escenarios P-1, P-2 y P-3, respectivamente (ver Fig. 2.27 a 2.29). Un total de 60 usuarios están distribuidos uniformemente con una distancia mínima UE-MBS de 35 m. Se han generado 8 realizaciones espaciales de las ubicaciones de UE según un Proceso de

Tabla 2.6: Parámetros de simulación por defecto

Parameter	Value
Carrier Freq.	2 GHz
Bandwidth	10 MHz
Transmission Power	43 dBm (MBS), 30 dBm (SBSs)
Simulation Time	20000ms
Transmission Mode	SISO
Number of users	60
Association Criterion	Máx. RSRP+Bias
Distances MBS-SBSs	40, 100, 160 m
Hexagon Apothem	250 m
Spatial Distribution process	BPP
No. of Spatial Realization	8
Path Losses	ITU UMa, ITU Umi
Fast Fading	ITU UMa
Scheduler	Round Robin
Max. Allocation per user	15 PRBs
Source	FTP Model 3, $\lambda = 2,5$, 0.5 MB
Decoding Algorithm	SOVA
Link Adaptation Method	OLLA
Channel Estimation	Ideal
SNR Estimation	Error based

Punto Binomial. Para cada realización espacial, hemos realizado una simulación de 20000 subtramas. En la Fig. 2.30, hay un ejemplo de realización espacial de usuarios. Posteriormente, los resultados se promedian en el dominio espacial y temporal para obtener los indicadores de rendimiento previstos. Además, la asociación de los usuarios a las celdas tiene en cuenta tanto la potencia recibida como el sesgo CRE, con un rango de valores entre 0 dB y 30 dB.

La BS está configurada para transmitir con un ancho de banda de 10 MHz en una portadora de 2 GHz. La potencia de transmisión de las MBS y SBS es de 43 dBm y 30 dBm, respectivamente. Se usa AMC junto con la técnica OLLA y un planificador de paquetes Round Robin. Las pérdidas de propagación se calculan siguiendo la definición para Macro urbana (UMa) de la UIT y la Micro urbana (Umi) [54]. Se considera un modelo de Rayleigh para los desvanecimientos por propagación

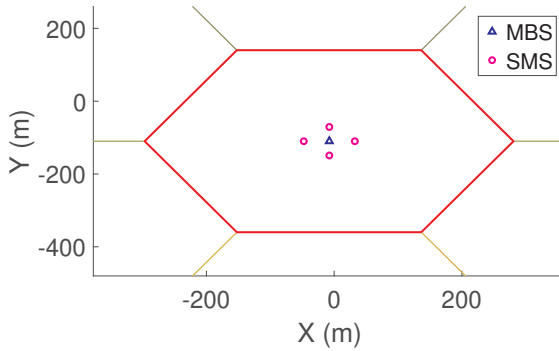


Figura 2.27: Escenario P-1

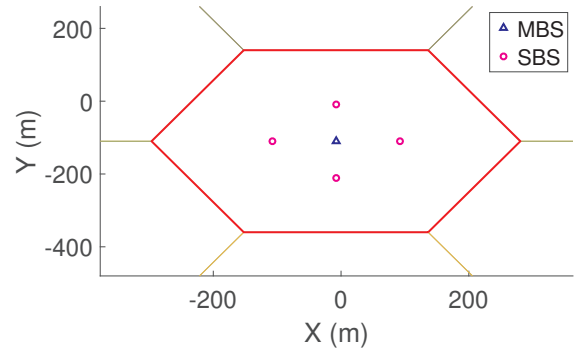


Figura 2.28: Escenario P-2

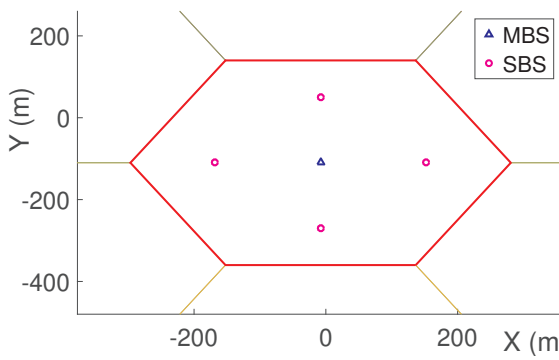


Figura 2.29: Escenario P-3

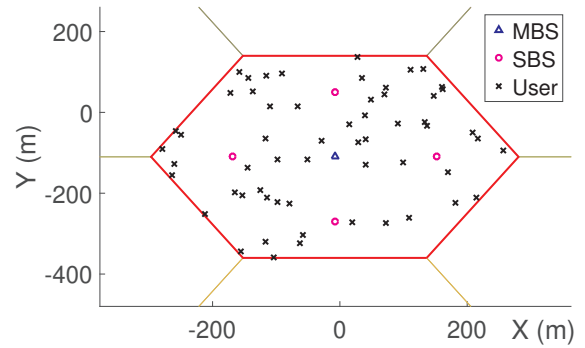


Figura 2.30: Realización espacial de usuarios

multicamino con la configuración UMA de la UIT [55]. Se utiliza un modelo de tráfico para el Protocolo de transferencia de archivos (FTP); en particular, consideramos el modelo de FTP 3 [54], donde los paquetes llegan de acuerdo con un proceso de Poisson con un tiempo de llegada de paquete que sigue una distribución exponencial. Además, los archivos tienen un tamaño de 0.5 Mbytes.

Las métricas que se analizan son las siguientes: asociación de usuarios por nivel, carga de PRBs por nivel, Tasa de transmisión agregada, porcentaje de usuarios de baja tasa de transmisión e imparcialidad.

Asociación de usuarios por nivel Representa el número de usuarios que están asociados al nivel 1 (MBS) y al nivel 2 (SBS). Cada usuario se asociará a la celda con el nivel de potencia recibido (RSRP) máximo medido más el sesgo CRE.

Carga de PRBs por nivel Este es el porcentaje de PRBs utilizados por nivel. Como el ancho de banda simulado es de 10 MHz, el uso máximo del nivel 1 es de 50 PRB, mientras que para el nivel 2 es de 200 PRB (4 celdas pequeñas).

Tasa de transmisión agregado Se calcula como los bits agregados recibidos por todos los usuarios (de ambos niveles) por segundo.

Porcentaje de usuarios de baja tasa de transmisión Se usa para mostrar el porcentaje de usuarios que tienen una tasa de transmisión baja, es decir, menos de 10kbps, nombrada como usuarios de tasa baja (LRU).

Imparcialidad Se usa para determinar si los usuarios reciben una parte justa de los recursos del sistema. El índice de Jain se utiliza para calcular la imparcialidad de las celdas simuladas de la siguiente forma:

$$J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.16)$$

donde x_i es el número total de bits recibidos por el usuario i , y n representa el número de usuarios.

A continuación se presentan los resultados de simulación para diferentes valores de sesgo CRE. Tenga en cuenta que, al aumentar el sesgo, los usuarios se asociarán a una SBS con menos carga a costa de reducir su SINR. Es un compromiso entre los recursos disponibles y la SINR, ya que el sesgo aumenta la SINR más baja en la nueva celda de servicio. En consecuencia, la transferencia de usuarios del nivel 1 al nivel 2 debido a un alto valor de sesgo puede causar que los usuarios no pueden transmitir o tengan tasas de transmisión demasiado bajas.

En la Fig. 2.31, se muestra la asociación de usuarios para los escenarios P-1, P-2 y P-3 en función del sesgo. Por un lado, las líneas continuas representan la asociación del usuario a nivel 1 (MBS). Por otro lado, las líneas discontinuas representan la asociación a nivel 2 (SBS). Se puede ver que el punto de intersección donde el 50 % de los usuarios se dividen por igual en ambos niveles se alcanza antes, ya que las SBSs están más alejadas de la MBS. En P-1, la MBS está cerca de las SBSs y, por lo tanto, es difícil equilibrar a los usuarios de la MBS debido a su alta potencia.

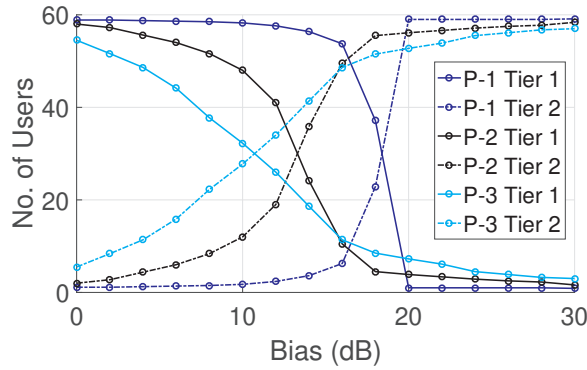


Figura 2.31: Asociación de usuarios por nivel

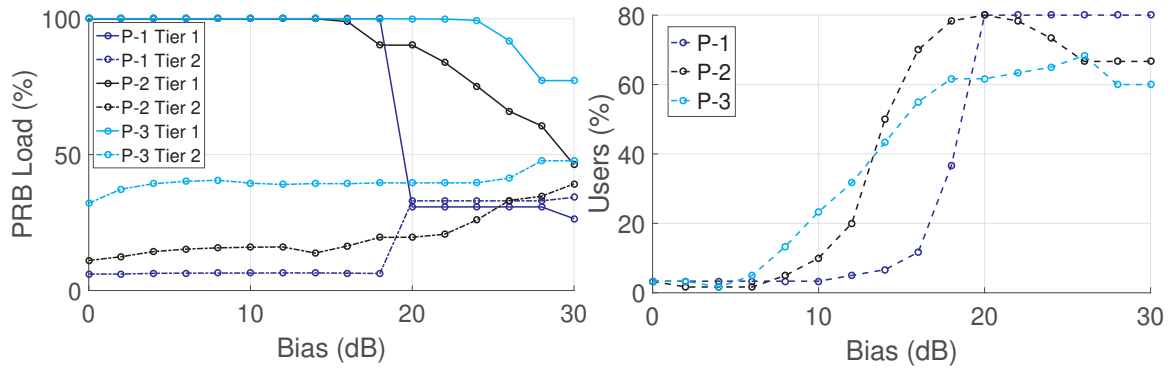


Figura 2.32: Porcentaje de Carga de PRB por nivel

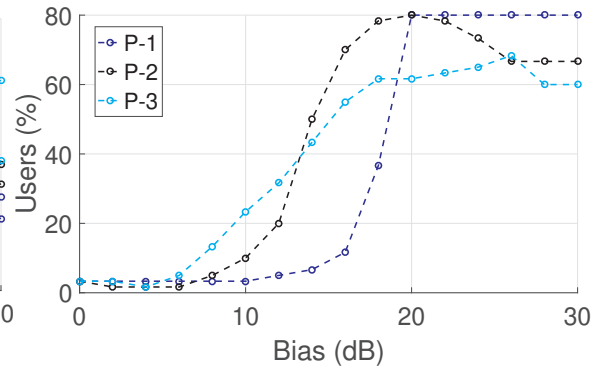


Figura 2.33: Porcentaje de usuarios de baja tasa de transmisión

Además, la carga por nivel (Fig. 2.32) es un resultado que está vinculado a la figura anterior. Al principio, cuando el sesgo es bajo, la MBS se carga al 100% y cuando aumenta el número de usuarios asociados al nivel 2, la MBS se descarga. Tenga en cuenta que, aunque la cantidad de usuarios asociados al nivel 2 crece, no todos los usuarios pueden transmitir debido a su baja SINR. En la Fig. 2.33 se puede ver que el número de usuarios con baja tasa de transmisión aumenta cuando aumenta el sesgo porque estos usuarios se ven obligados a asociarse a una SBS pero con una SINR que no es suficiente para transmitir, principalmente por la interferencia de la MBS. La diferencia entre las tres curvas se produce para valores de alto sesgo. Para P-2 y P-3, el número de usuarios de baja tasa de transmisión disminuye con valores de alto sesgo. Esto se debe al hecho de que la interferencia se reduce cuando la MBS se carga por debajo del 90% y, en consecuencia, los usuarios pueden transmitir con

mejores condiciones. Por el contrario, para P-1, el número de usuarios de tasa baja permanece constante con un valor de 80 % porque el usuario más cercano a la MBS siempre está asociado a ella.

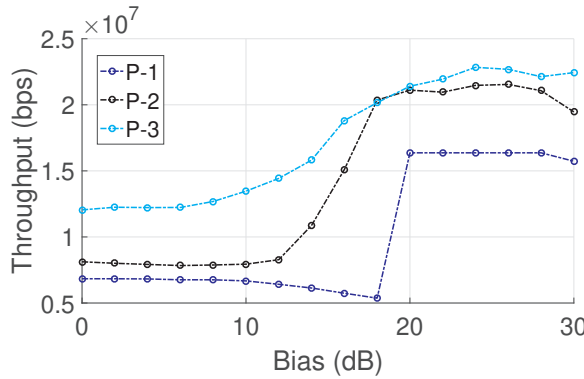


Figura 2.34: Tasa de transmisión agregada

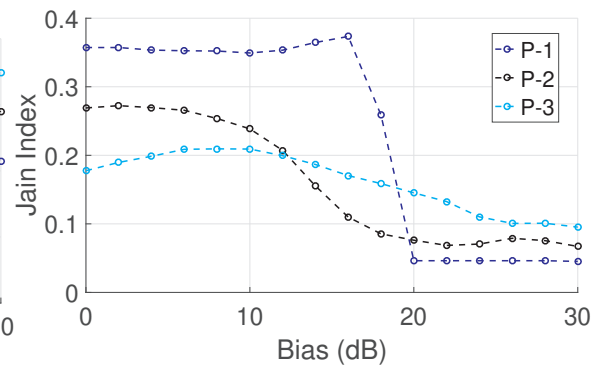


Figura 2.35: Imparcialidad (índice de Jain)

En la Fig. 2.34 se muestra la tasa de transmisión agregada de todas las celdas simuladas. Para valores de sesgo inferiores a 10 dB, el rendimiento de P-1 y P-2 disminuye progresivamente. Esto se debe a que los peores usuarios asociados a la MBS ahora están asociados a las SBSs y su velocidad de transmisión ahora es menor o nula. Sin embargo, para P-3, el rendimiento aumenta ligeramente para un sesgo de 2 dB como resultado de la nueva asociación de usuarios. Esto se debe a que con un sesgo inferior a 2 dB, los usuarios se asocian a una MBS bastante cargada. Sin embargo, con un sesgo de 2 dB, los usuarios pueden transmitir asociados a una SBS descargada. Por tanto, para valores de sesgo más altos, el rendimiento agregado crece rápidamente, pero esto se debe a dos factores. Por un lado, se asignan más usuarios al nivel 2, pero su SINR es tan baja que no pueden transmitir, por lo que hay más recursos para usar en la MBS. Por otro lado, la fuente principal de interferencia (la MBS) está menos cargada, por lo que la interferencia del área disminuye y, en consecuencia, la condición para la transmisión es mejor.

La imparcialidad se muestra en la Fig. 2.35, la cual está estrechamente relacionada con los usuarios de baja tasa. Para los tres casos, la imparcialidad óptima se logra cuando los usuarios de baja tasa están por debajo del 13 %. Al principio, la mayoría de los usuarios mejoran su rendimiento y otros usuarios pueden estar apagados, pero

en general el sistema es más justo. Cuando se alcanza la imparcialidad óptima, más usuarios se convierten en usuarios de baja tasa y la imparcialidad disminuye.

2.3. Desarrollo de una herramienta de simulación para LTE-Advanced

Disponer de herramientas de simulación que permitan analizar las prestaciones de los sistemas de comunicaciones móviles es muy importante dado que permiten realizar pruebas reproducibles con un bajo coste asociado.

Por una parte, es importante aplicar un modelo lo suficientemente exacto como para que se contemplen las principales características del sistema, pero también debe ser lo más simplificado posible a fin de que el tiempo de simulación no sea excesivamente elevado. Esto exige, por tanto, un compromiso entre complejidad del modelo a utilizar y eficiencia en cuanto a tiempo de simulación.

En la literatura, existen distintas herramientas de simulación para sistemas LTE-A que cumplen este objetivo. Concretamente, en [56] se presenta un simulador LTE implementado en Matlab. Esta herramienta consiste en realidad en dos simuladores independientes: uno de enlace, que permite obtener tablas con resultados de capa física; y otro simulador de sistema, que usa estos resultados almacenados previamente en tablas. De este modo se consigue abstraer la capa física en las simulaciones que involucran capas superiores.

Otro ejemplo se encuentra en [57], donde se presenta la herramienta SimuLTE. Esta herramienta ofrece gran flexibilidad, ya que al estar basado en OMNeT++ se le pueden añadir distintos módulos. Como por ejemplo INET, el cual permite simular aplicaciones en tiempo real que usan diversas tecnologías de acceso radio. También cabe mencionar las herramientas presentadas en [58] y [59]. La primera de ellas, desarrollada en C++, contempla una gran cantidad de funcionalidades tales como movilidad, handover, diferentes planificadores, etc. La segunda, basada en ns-3, ha sido diseñada para permitir una simulación extremo a extremo asumiendo modelos de tráfico realistas.

Una característica común a los citados simuladores es que todos ellos aplican una estrategia de simulación de la capa física basada en tablas. De esta forma, se

consigue reducir los tiempos de simulación, pero da lugar a una pérdida de precisión que deriva del mecanismo de abstracción.

El simulador Wireless Mobile SIMulation Advanced (WM-SIMA) [60] [61] ha sido diseñado para simular con gran detalle la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) sin usar tablas que abstraigan la capa física. WM-SIMA considera el enlace descendente (DL) de un sistema multi-celda Long Term Evolution Advanced (LTE-A) en modo duplexación por división en frecuencia (FDD) considerando el acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA) como técnica de acceso al medio [62]. Se trata de una evolución de la herramienta WM-SIM [63] en cuanto a que soporta esquemas de transmisión con múltiples antenas (Multiple Input Multiple Outputs, MIMO) con configuraciones de hasta 8x8, y con posibilidad de considerar varias Components Carriers (CCs) si se activa la opción de Carrier Aggregation (CA), entre otras nuevas funcionalidades.

2.3.1. Arquitectura del Simulador

Podemos distinguir dos niveles en la arquitectura del simulador: *nivel de sistema* y *nivel de enlace*, los cuales se detallan a continuación.

Nivel de sistema

Este nivel, implementado en Matlab, proporciona la información de despliegue de la red móvil a simular. Para ello, utiliza una serie de parámetros configurables como son número de terminales móviles (UEs), número y tipo de puntos de acceso (APs), potencia de transmisión de APs, área de celda, entre otros.

Se distinguen dos tipos de APs: macro (MAPs) y pico (PAPs). De esta forma, es posible considerar redes homogéneas donde sólo se tienen MAPs; o redes heterogéneas compuestas por ambos tipos de APs. En este caso, cada tipo de AP tendrá asociadas unas características en cuanto a potencia de transmisión y pérdidas de propagación. Otro aspecto de la red configurable es el tipo de grid a aplicar, que puede elegirse hexagonal o aleatorio, para el cual las celdas se sitúan siguiendo una distribución espacial uniforme.

Por otra parte, es posible indicarle al *nivel de enlace* que simule sólo un subconjunto de los APs y UEs que componen la red reduciendo, por tanto, el coste

computacional de simulación. El subconjunto simulado estará compuesto por aquellos MAPs que se encuentren en la región central del área total definida por la red, así como los elementos que tenga asociados: UEs y PAPs. El efecto del resto de elementos no simulados en la red se modelará como interferencia Gaussiana.

Una vez posicionados los UEs y APs, se obtiene la siguiente información:

- Asociación de UEs a APs, que se puede llevar a cabo en base a dos criterios: pérdidas de propagación mínima o mayor potencia media recibida. Si se elige este último cuando se tiene un escenario heterogéneo, es posible aplicar un incremento (sesgo) sobre la potencia de transmisión de las PAPs de manera que se amplía su área de cobertura. Esta técnica, conocida como *Cell Range Expansion* (CRE) [53], consigue reducir la carga asociada a las MAPs puesto que al aplicar el sesgo se fuerza a que UEs que estarían asociados a una MAP se asocien a una PAP. Ahora bien, estos usuarios forzados o CRE UEs, suelen tener unos valores de nivel de señal a interferencia (SINR) muy degradados debido a que la MAP a la que estarían asociados de forma natural actúa ahora como interferente.
- Potencia media interferente que recibe cada elemento simulado desde el resto de elementos (UEs y APs) no simulados que componen la red celular.
- Ganancia del camino entre cada UE y AP simulado.
- Nivel de SINR medio para cada UE simulado.
- Potencia media de transmisión de cada AP simulado.

Toda esta información se almacena en un fichero .mat que será utilizado posteriormente por la parte de *nivel de enlace* para realizar la simulación.

Nivel de enlace

Este nivel, basado en C++, lleva a cabo el procesado de las capas PHY y MAC para la configuración de red establecida. La Fig. 2.36 muestra la arquitectura del simulador asociada a este nivel. Se observa cómo la herramienta se compone de cinco grandes bloques: transmisor (*Transmitter*), receptor (*Receiver*), canal radio

MIMO (*Extended MIMO Channel*), planificador cross-layer (*MAC Scheduler*) y medidas (*QoS Statistics*).

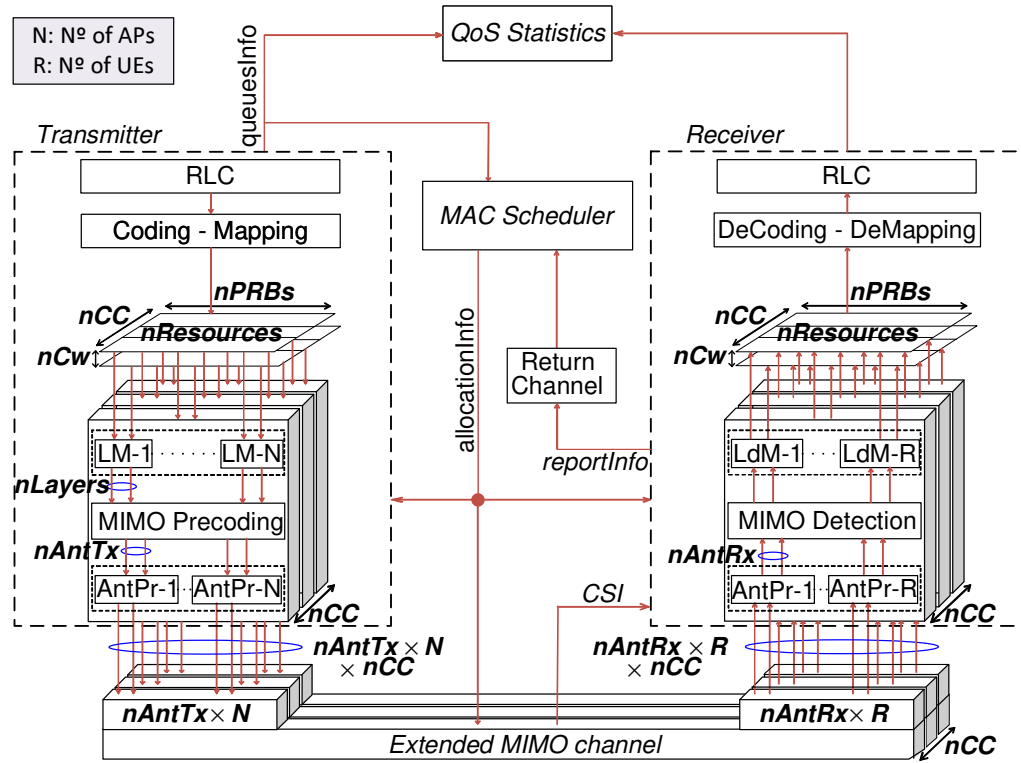


Figura 2.36: WM-SIMA: Arquitectura de nivel de enlace

Transmitter Es el encargado de generar los paquetes RLC (Radio Link Control), encolarlos y segmentarlos en bloques de transporte (TBs) en base a la información que recibe del planificador (*allocationInfo*). Para ello se dispone de 3 modelos de fuentes: *Full buffer*, en la que los UEs siempre tienen información para transmitir; *Streaming*, según una distribución de Pareto; o *Trazas*, que se cargan de un fichero .mat. Sobre los TBs generados, se aplica un esquema de modulación y codificación adaptativo para obtener dinámicamente los símbolos complejos que se mapearán sobre los recursos físicos disponibles. El número total de recursos (*nResources*) dependerá del ancho de banda considerado (*nPRBs*, número de Physical Resource Blocks), del número de CC (*nCC*) y de la configuración de antenas, que determina el número de *codewords*¹ (Cw) disponibles (*nCw*). A continuación, realiza un

¹En este trabajo el término *codeword* hace referencia a un TB codificado y modulado de forma

procesado MIMO que implica: un mapeo de C_w a *layers*, realizado por el bloque Layer Mapping (*LM*) asociado a cada AP; y una precodificación MIMO, si procede. Por último, se realiza un procesamiento de antenas (*AntPro*) para la generación de los símbolos OFDM que se transmiten sobre el canal radio.

Receiver Realiza el proceso inverso al llevado a cabo en el transmisor con el objetivo de recuperar los TBs enviados. En efecto, a partir de los símbolos OFDM recibidos recupera la información transmitida haciendo uso tanto de la señalización (*allocationInfo*) como de la estimación de canal que realiza el propio bloque. Esta estimación puede ser: ideal, coincidiendo con el reporte recibido del canal (*CSI*); o estimada, a partir de los pilotos en la subtrama LTE-A.

Extended MIMO channel Modela el efecto que tiene el canal de comunicaciones móviles inalámbrico. Para ello, genera tantos canales independientes como caminos haya entre cada UE y AP simulados dependiendo de la configuración de antenas elegida. En cada uno de ellos se modelan los siguientes efectos:

1. Desvanecimiento selectivo en frecuencia, mediante un modelo de línea de retardo multitrayecto en el que la ganancia y retardo asociado a cada trayecto son configurables. Las muestras del canal pueden seguir una distribución Rayleigh o Rice. En caso de que se tenga una configuración MIMO, se utiliza el modelo de Kronecker [64] para determinar la correlación espacial entre antenas.
2. Interferencia, que se añade sobre la señal recibida en cada receptor desde el subconjunto de transmisores simulados.
3. Ruido Gaussiano blanco (AWGN), que para cada receptor añade ruido Gaussiano en cada una de sus antenas. Hay que recordar que la potencia de ruido aquí añadida tiene en cuenta la interferencia del resto de elementos no simulados que componen la red.

Por último, cabe destacar que existe la posibilidad de que este bloque funcione en el dominio del tiempo, de manera que se simula el canal con gran exactitud, o de la frecuencia, con lo que los símbolos OFDM se ven afectados directamente por la respuesta en frecuencia del canal simulado. En caso de simular el canal en frecuencia independiente.

se reduce el tiempo de simulación a costa de asumir que la transmisión está libre de interferencia entre símbolos (ISI) y entre portadoras (ICI).

MAC Scheduler Se encarga de llevar a cabo la planificación en cada intervalo de transmisión (TTI) para repartir los recursos tiempo-frecuencia entre los UEs en función del algoritmo seleccionado. Para ello tiene en cuenta la información que recibe por usuario basada en el estado de las colas (*queuesInfo*) y en el estado de los procesos HARQ y el canal radio (*reportInfo*).

Independientemente del algoritmo, se ha optado por dar prioridad a las retransmisiones pendientes frente a la transmisión de nueva información. En efecto, en cada TTI se intentan asignar recursos primero a las retransmisiones asociadas a cada UE. Para ello, se aplica un criterio de búsqueda cíclico sobre los usuarios con retransmisiones pendientes para determinar el siguiente UE a tratar. Una vez seleccionado, el planificador determina los recursos concretos sobre los que se hará la retransmisión. Tras planificar las retransmisiones, los recursos restantes se asignan a la transmisión de nueva información. En este caso, el planificador determina tanto el usuario a tratar como los recursos concretos a asignarle.

Cabe destacar que la asignación de recursos se hace aplicando el Tipo 2 de los posibles criterios de *Resource Allocation* definidos por el 3GPP para el DL. Así, en cada *codeword*, los PRBs se asignan en bloques de PRBs consecutivos cuyo tamaño será múltiplo del tamaño mínimo de asignación asociado al ancho de banda de simulación [65].

Los algoritmos de planificación implementados son: Round Robin, Proportional Fair, Channel Dependent Earliest Deadline Due (CDD-EDD), CDD-EDD with postponent term y Opportunistic Hard Priority.

QoS Statistics Genera estadísticos asociados a la simulación tales como tasa de error de bit (Bit Error Rate, BER), de bloque (Block Error Rate, BLER), throughput, información relacionada con las colas de usuario, etc. Para ello tiene en cuenta la información que recibe del receptor y del estado de las colas de los UEs (*queuesInfo*). Los estadísticos obtenidos se almacenan en un fichero *.mat* al finalizar la simulación, de manera que es posible hacer un procesamiento *offline* de los mismos.

Capítulo 3

Conclusiones y Líneas Futuras de Trabajo

3.1. Conclusiones

En esta tesis se ha realizado un análisis de técnicas de gestión de recursos radio sobre redes celulares LTE-Advanced.

El primer bloque de técnicas está centrado en algoritmos de planificación de recursos radio, comenzado por aquellos que tienen en cuenta requisitos de retardo del tráfico. Los resultados de la simulación muestran que, para valores bajos de SNR (entre 0 y 15 dB), los tres algoritmos evaluados son capaces de reducir considerablemente el retardo medio y el percentil 95 del retardo a costa de descartar aquellos paquetes que excedan un cierto umbral. Para valores altos de SNR (de 15 a 30 dB), los resultados de retardo están influenciados principalmente por la función de utilidad de cada algoritmo. En este sentido, el algoritmo denominado *CD-EDD with postponed EDD term* logra el mejor rendimiento.

Posteriormente, se ha analizado la imparcialidad entre usuarios para un algoritmo PF con criterios de SNR y de tasa de transmisión, obteniendo expresiones de forma cerrada para la distribución de la SNR por usuario y del sistema para este segundo caso. Los resultados muestran diferencias notables en términos de distribución de probabilidad asociada con la SNR por usuario y por sistema. En particular, los resultados muestran que el criterio de PF basado en la tasa siempre es más justo que

el basado en la SNR (especialmente a medida que aumenta el número de usuarios en la celda) aunque a costa de degradar la tasa de transmisión total del sistema.

También se ha abordado la gestión de recursos para una arquitectura C-RAN. En particular, se ha analizado el impacto del retardo en el informe H-ARQ sobre el rendimiento del usuario. Los resultados muestran que la tasa neta de transmisión disminuye cuando el retardo del informe H-ARQ es mayor que el tiempo requerido para la ejecución de los procesos HARQ.

El segundo bloque de técnicas se ha centrado en aquellas orientadas a la gestión de interferencias. En particular, se ha comenzado por el análisis del rendimiento del sistema en un despliegue celular basado en FFR cuando se utilizan tres esquemas de asignación de recursos diferentes: ERS, ETR, ETR Truncado. Se ha propuesto un método para determinar la tasa total de transmisión y el ancho de banda óptimo de partición de cada celda bajo cada estrategia de planificación de recursos. Se demuestra que la tasa total de transmisión es máxima para la estrategia ERS mientras que ETR consigue la más baja. El análisis de imparcialidad muestra que la estrategia más justa es la política de ETR, que logra el menor valor del índice de Gini a costa de disminuir la tasa media de transmisión. Dicho compromiso puede solventarse usando la política ETR truncada a través del parámetro ϵ .

Posteriormente se han analizado las técnicas coordinadas para la gestión de interferencias cuando se aplica desde varios puntos de acceso (CoMP). En particular, se ha evaluado la técnica de Transmisión Conjunta (JT) sin precodificación y se ha comparado con la técnica PFR para la transmisión de tráfico M2M. Los resultados han mostrado que ambas técnicas mejoran el rendimiento de los usuarios del borde de la celda en comparación con la configuración de referencia. Además, la técnica PFR presenta mejor resultado en términos de retardo y tasa media de transmisión para el tipo de tráfico considerado. De hecho, PFR mejora significativamente los resultados de retardo tanto para la celda observada como para los usuarios ubicados en el borde de la celda. Teniendo en cuenta los resultados, se puede concluir que el uso de JT sin precodificación no es adecuado cuando se considera el tráfico M2M.

En último lugar, se aborda una de las técnicas ICIC más importantes sobre redes heterogéneas: Expansión del Rango de la Celda (CRE). Se ha analizado la influencia del valor del sesgo asociado a la técnica CRE sobre las prestaciones medias de una

red LTE-A heterogénea considerando varias densidades de PAPs. Los resultados obtenidos muestran que un aumento del sesgo produce siempre una descarga de la MAP mientras que existe un valor óptimo del mismo en términos de eficiencia espectral. Dicho valor óptimo no depende de la densidad de PAPs considerada. Ahora bien, un incremento del número de PAPs sí implica un incremento en el rendimiento medio de la red en términos de bits/s/Hz/m^2 .

Finalmente, se ha presentado la herramienta WM-SIMA, la cual permite simular el enlace descendente de un sistema de comunicaciones móviles LTE-A. Para ello, se han implementado las principales funcionalidades asociadas a la capa PHY y MAC de este tipo de sistemas. Ha quedado reflejado tanto la configurabilidad como la variedad de resultados que permite obtener WM-SIMA.

3.2. Líneas Futuras de Trabajo

A continuación se describen algunas propuestas de futuras líneas de trabajo:

- Una de las cuestiones clave en la evolución de las redes celulares hacia 5G es el cambio a una banda de frecuencias más alta, en ondas milimétricas (mmW), lo que plantea desafíos adicionales. Uno de los desafíos es la gestión de las interferencias en redes basadas en mmW. Entre las técnicas que se barajan para estos escenarios se encuentran: la gestión dinámica de la potencia de transmisión (bajo demanda), así como el silenciamiento coordinado, la supresión de la señal interferente o el uso inteligente de múltiples antenas.
- Los sistemas inalámbricos de nueva generación (como 5G) están pensados para abarcar un amplio conjunto de escenarios con requisitos muy diversos, como son: muy baja latencia y alta fiabilidad, muy alta densidad de usuarios, muy alta eficiencia espectral, etc. Por este motivo, deben surgir nuevos algoritmos de reparto de recursos (*scheduling*) que se adapten a dichos requisitos y que aborden macro-celdas y pico/femto-celdas. Una segunda línea de investigación podría ir enfocada a algoritmos específicos para cada escenario.
- Recientemente se han puesto en auge los algoritmos de transmisión de contenido multimedia adaptativos a la capacidad. Una última línea de investigación

podría ir enfocada a la definición y evaluación de nuevos algoritmos de reparto de recursos en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) que tengan en cuenta la información de la capa de aplicación (*cross-layer*) con objeto de optimizar dicha adaptación y mejorar la calidad de experiencia final del usuario. Para ello, haría falta definir una capa encargada de traducir el impacto de los distintos indicadores de calidad en la red sobre la calidad de experiencia final del usuario.

Bibliografía

- [1] 3GPP TS 36.201 v8.0.0, "Physical Layer. General Description (Release 8)", 2009.
- [2] 3GPP TS 36.201 v10.0.0, "Physical Layer. General Description (Release 10)", 2010.
- [3] A. J. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2005.
- [4] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamai Shitz, O. Simeone, Wei Yu, "Multi-Cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.28, no.9, pp.1380-1408, Dec 2010.
- [5] Shaohui Sun, Qiubin Gao, Ying Peng, Yingmin Wang, Lingyang Song, "Interference management through CoMP in 3GPP LTE-advanced networks," IEEE Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 59-66, 2013.
- [6] S. Landström, A. Furuskar, K. Johansson, L. Falconetti, F. Kronestedt, "Heterogeneous networks – Increasing cellular capacity", Ericsson review, 2011.
- [7] J.T. Entrambasaguas, M.C. Aguayo-Torres, G. Gómez, J.F. Paris, "Multi-user capacity and fairness evaluation of channel/QoS aware multiplexing algorithms," IEEE Network, Vol. 21, Issue 3, May 2007.
- [8] Jun Cai, Xuemin Shen, Jon W. Mark, "Downlink Resource Management for Packet Transmission in OFDM Wireless Communication Systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.4, No.4, Jul 2005.

- [9] W. Ajib, D. Haccoun, "An Overview of Scheduling Algorithms in MIMO-based Fourth Generation Wireless Systems," *IEEE Network*, pp.43-48, Sep 2005.
- [10] Q. Liu, S. Zhou, G. B. Giannakis, "Cross-Layer Scheduling with Prescribed QoS Guarantees in Adaptive Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.23, No.5, May 2005.
- [11] T.D. Novlan, R.K. Ganti, A. Ghosh, J.G. Andrews, "Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA Cellular Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.10, Issue 12, pp.4294-4305, Dec 2011.
- [12] B. Soret, Wang Hua, K.I. Pedersen, C. Rosa, "Multicell cooperation for LTE-advanced heterogeneous network scenarios," *IEEE Wireless Communications magazine*, vol.20, no.1, pp.27-34, Feb 2013.
- [13] K.I. Pedersen, Wang Yuanye, B. Soret, F. Frederiksen, "eICIC Functionality and Performance for LTE HetNet Co-Channel Deployments," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp.1-5, Sep 2012.
- [14] M. Cierny, H. Wang, R. Wichman, Z. Ding, C. Wijting, "On Number of Almost Blank Subframes in Heterogeneous Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp.1-13, Sep 2013.
- [15] 3GPP TS 23.107 V8.2.0, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Quality of Service (QoS) concept and architecture (Release 8)", 2011.
- [16] H. Luo, S. Ci, D. Wu, J. Wu, H. Tang, "Quality-driven cross-layer optimized video delivery over LTE". *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 102-109, February, 2010.
- [17] B. Sadiq, R. Madan, A. Sampath, "Downlink Scheduling for Multiclass Traffic in LTE". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.
- [18] Y. Qian, C. Ren, S. Tang, M. Chen, "Multi-service QoS guaranteed based down-link cross-layer resource block allocation algorithm in LTE systems". *Internation-*

- tional Conference on Wireless Communications and Signal Processing, pp. 1-4, November, 2009.
- [19] 3GPP TS 23.203 V11.3.0, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture (Release 11)", 2011.
- [20] Viswanath, P., Tse, D. N. C., Laroia, R., "Opportunistic beamforming using dumb antennas", IEEE Transactions on Information Theory, 48(6), pp. 1277–1294, 2002.
- [21] Shakkottai, S., Stolyar, A. L., "Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-realtime data in HDR", In Proceedings of 17th international teletraffic congress, Vol. 4, pp. 793-804, 2001.
- [22] Valkova-Jarvis, Z. V., Stoyanov, V. R., "Novel throughput quantile averaging methods for the proportional fair algorithm in indoor mobile networks", In 2017 Advances in wireless and optical communications (RTUWO), Riga, pp. 198-202, 2017.
- [23] Liu, E., Leung, K., "Expected throughput of the proportional fair scheduling over Rayleigh fading channels", IEEE Communications Letters, 14(6), pp. 515–517, 2010.
- [24] Pérez, J. and *et. al.*, "Performance analysis of SNR-based scheduling policies in asymmetric broadcast ergodic fading channel", EURASIP J. Wirel. Com. Netw., vol. 8, pp. 1-6, 2009.
- [25] Yang, L., Alouini, M.-S., "Performance analysis of multiuser selection diversity", IEEE Trans. on Vehic. Technology, vol. 55, no. 6, pp. 1848-1861, 2006.
- [26] D. Parruca, M. Grysla, S. Gortzen and J. Gross, "Analytical Model of Proportional Fair Scheduling in Interference-Limited OFDMA/LTE Networks," 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Las Vegas, NV, pp. 1-7, 2013.

- [27] M. Kang, Y. J. Sang, H. G. Hwang, H. Y. Lee and K. S. Kim, "Performance Analysis of Proportional Fair Scheduling with Partial Feedback Information for Multiuser Multicarrier Systems," VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference, Barcelona, pp. 1-5, 2009.
- [28] A. Senst, P. S. Rittich, G. Ascheid, and H. Meyr, "On the throughput of proportional fair scheduling with opportunistic beamforming for continuous fading states," in Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC), Vol. 1, pp. 300-304, Los Angeles, CA, 2004.
- [29] N. Sharma and L. H. Ozarow, "A study of opportunism for multiple-antenna systems," in IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 51, no. 5, pp. 1804-1814, 2005.
- [30] L. Yang, M. Kang, and M.-S. Alouini, "On the capacity-fairness tradeoff in multiuser diversity systems," in IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 56, no. 4, pp. 1901-1907, 2007.
- [31] H. Tabassum, F. Yilmaz, Z. Dawy and M. S. Alouini, "On the modeling of uplink inter-cell interference based on proportional fair scheduling," 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Paris, pp. 317-321, 2012.
- [32] D. Parruca, J. Gross, "Throughput Analysis of Proportional Fair Scheduling for Sparse and Ultra-Dense Interference-Limited OFDMA/LTE Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, pp. 6857-6870, 2016.
- [33] Isabel M. Delgado-Luque, M. Carmen Aguayo-Torres, Gerardo Gomez, Francisco J. Martin-Vega, Jose T. Entrambasaguas, "SNR- Versus Rate-based Proportional Fair Scheduling in Rayleigh Fading Channels", Wireless Personal Communications, pp. 1-13, 2018.
- [34] IST-WINNER II Deliverable 1.1.2 v.1.2, "WINNER II Channel Models", IST-WINNER2, Tech. Rep., 2007 (available online: [http://www.cept.org/files/1050/documents/winner2 %20-%20final %20report.pdf](http://www.cept.org/files/1050/documents/winner2%20-%20final%20report.pdf))

- [35] Sezer, S., Scott-Hayward, S., Chouhan, P. K., Fraser, B., Lake, D., Finnegan, J., Viljoen, N., Miller, M., Rao, N., "Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks", *IEEE Communications Magazine*, 51(7), pp. 36-43, 2013.
- [36] Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J. L., Bouten, N., Turck, F. D., Boutaba, R., "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(1), 236-262, 2016.
- [37] Wu, J., Zhang, Z., Hong, Y., Wen, Y., "Cloud radio access network (C-RAN): a primer", *IEEE Network*, 29(1), pp. 35-41, 2015.
- [38] 3GPP TR 38.801 v2.0.0. Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14). http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.801/38801-200.zip. Accessed 28 May 2018.
- [39] NGMN Forum. Further study on critical C-RAN technologies. Technical Deliverable. Available at: https://www.ngmn.org/fileadmin/user_upload/NGMN_RAN_EV_D2_Further_Study_on_Critical_C-RAN_Technologies_v1.0.pdf. Accessed 28 May 2018.
- [40] Rost, P., Bernardos, C., Domenico, A., Girolamo, M., Lalam, M., Maeder, A., Sabella, D., Wuebben, D., "Cloud technologies for flexible 5G radio access networks", *IEEE Commun Magazine*, 52(5), pp. 68-76, 2014.
- [41] 3GPP TS 36.321 v15.1.0. Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 15). http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.321/36321-f10.zip. Accessed 28 May 2018.
- [42] 3GPP TS 36.213 v15.1.0. Physical layer procedures (Release 15). http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.213/36213-f10.zip. Accessed 28 May 2018.
- [43] ITU-R M.2135-1, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced", https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf. Accessed 28 May 2018.

- [44] Blázquez-Casado, F., Gómez, G., Aguayo-Torres, M. C., Entrambasaguas, J. T., "eOLLA: an enhanced outer loop link adaptation for cellular networks", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 20, 2016.
- [45] Liu, X., Chong, E. K. P., Shroff, N. B. "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks", Computer Networks, 41(4), pp. 451-474, 2002.
- [46] Abdel-Baset Hamza *et al.*, "Inter-Cell Interference Coordination", In 4G++ Project: Advanced Performance Boosting Techniques in 4th Generation Wireless Systems, Deliverable D4.1, 2011.
- [47] Bilio, D., Bouras, C., Kokkinos, V., Papazois, A., Tseliou, G., "Optimization of Fractional Frequency Reuse in Long Term Evolution Networks", In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1853-1857, 2012.
- [48] Necker, M.C., "Coordinated Fractional Frequency Reuse", Proceedings of ACM Symposium on Modelling, Analysis, and simulation of Wireless and Mobile Systems, pp. 296-305, 2007.
- [49] Ali, S.H., Leung, V.C.M., "Dynamic Frequency Allocation in Fractional Frequency Reused OFDMA Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, issue 8, pp. 4286-4295, 2009.
- [50] Barnett, N.S., Dragomir, S.S., "Advances in Inequalities from Probability Theory and Statistics", Nova Science Publishers, 2008.
- [51] Shi, H., Seghu, H., Kanhere, S.S., "An Evaluation of Fair Packet Schedulers using a novel measure of Instantaneous Fairness", Compute Communications, vol. 28, pp. 1925-1937, 2005.
- [52] A. Alsawah, I. Fialkow, "Optimal frequency-reuse partitioning for ubiquitous coverage in cellular systems," in 16th European Signal Processing Conference - publi-etis.ensea.fr, 2008.

- [53] S. Singh and J. G. Andrews, "Joint Resource Partitioning and Offloading in Heterogeneous Cellular Networks", *IEEE Trans. on Wir. Comm.*, vol. 13, no. 2, pp. 888-901, Feb. 2014.
- [54] 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects. TR 36.814, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2017.
- [55] 3GPP, Technical Specification Group Radio Access Network; Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects. TR 36.819, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2013.
- [56] Christian Mehlh hrer, and *et al.* "The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research in *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, Dec. 2011.
- [57] A. Viridis, G. Stea and G. Nardini, "SimuLTE - A modular system-level simulator for LTE/LTE-A networks based on OMNeT++ " 2014 *4th International Conference On Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications*, Vienna, Austria, pp. 59-70, 2014.
- [58] G. Piro, and *et al.* "Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 498-513, Feb. 2011.
- [59] N. Baldo, and *et al.*, "An Open Source Product-Oriented LTE Network Simulator based on ns-3, " in *Proc. 14th ACM International Conference of Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 293-298, Nov. 2011.
- [60] *WM-SIM homepage*, [Online]. Available at:
<http://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/7438>
- [61] Alberto Carreras, Isabel M. Delgado-Luque, Francisco J. Martin-Vega, Gerardo Gomez, Mari Carmen Aguayo-Torres, J. Tomas Entrambasaguas, "A System-Level Simulator for the Downlink of LTE-A. Case of study: cell-offloading in

- HetNets”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 100, Issue 1, pp. 177–191, 2018.
- [62] *3GPP LTE-A Release 10 Specification*, [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>
- [63] G. Gómez and *et al.*, ”A Next Generation Wireless Simulator Based on MIMO-OFDM: LTE Case Study”, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2010, no. 15, pp. 1-12, Apr. 2010.
- [64] D.-S. Shui, and *et al.*, ”Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems”, *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 48, no. 3, pp. 502-513, 2000.
- [65] 3GPP TS 36.213, ”Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”, Release 10, V10.13.0, Jun. 2015.

Apéndice A

Copia de los Trabajos

En este apéndice se adjunta una copia de las publicaciones que avalan a esta tesis doctoral, las cuales son detalladas a continuación:

- Isabel M. Delgado-Luque, M. Carmen Aguayo-Torres, Gerardo Gomez, Francisco J. Martin-Vega, Jose T. Entrambasaguas, “SNR- Versus Rate-based Proportional Fair Scheduling in Rayleigh Fading Channels”, *Wireless Personal Communications*, pp. 1-13, 2018 (<https://doi.org/10.1007/s11277-018-5928-6>)
- Alberto Carreras, Isabel M. Delgado-Luque, Francisco J. Martin-Vega, Mari Carmen Aguayo-Torres, Gerardo Gomez, J. Tomas Entrambasaguas, Eneko Atxutegi, Ruben Solozabal, Bego Blanco, Jose Oscar Fajardo, Fidel Liberal, “Impact of Front-Haul Delays in Non-Ideal Cloud Radio Access Networks”, *Wireless Personal Communications*, 2018 (<https://doi.org/10.1007/s11277-018-5898-8>)
- Alberto Carreras, Isabel M. Delgado-Luque, Francisco J. Martin-Vega, Gerardo Gomez, Mari Carmen Aguayo-Torres, J. Tomas Entrambasaguas, “A System-Level Simulator for the Downlink of LTE-A. Case of study: cell-offloading in HetNets”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 100, Issue 1, pp. 177–191, 2018 (<https://doi.org/10.1007/s11277-018-5616-6>)
- Isabel M. Delgado-Luque, M. Carmen Aguayo-Torres, Gerardo Gomez, Jose T. Entrambasaguas, “A Framework to Evaluate Fairness in Fractional Frequency Reuse Based Cellular Networks”, *Wireless Personal Communications*, Vol. 95, Issue 2, pp. 287–297, 2017 (<https://doi.org/10.1007/s11277-016-3892-6>)

- I. M. Delgado-Luque, F. Blaquez-Casado, F.J. Martin-Vega, M. Garcia Fuertes, G. Gomez, M. C. Aguayo-Torres, J. T. Entrambasaguas, J. Banos, “Performance evaluation of cooperation-based techniques for M2M traffic over LTE”, IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 144-148, Sept. 2013
(<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666120>)
- I.M. Delgado-Luque, F. Blaquez-Casado, M. Garcia Fuertes, G. Gomez, M.C. Aguayo-Torres, J.T. Entrambasaguas, J. Banos, “Evaluation of Latency-aware Scheduling Techniques for M2M Traffic over LTE”, 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2012) Bucharest, Romania, pp. 989-993, Aug. 2012 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/6333920>)